



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA
Núcleo de Qualidade Metrológica

Proc. 1104/11/16133

CARACTERIZAÇÃO METROLÓGICA DO PADRÃO DE REFERÊNCIA DE HUMIDADE DO LCAM/LNEC (GERADOR DE HUMIDADE TSC 2500)

Estudo realizado no âmbito do Projecto de Investigação
"Reforço de Capacidades Metrológicas nos Domínios das
Grandezas Comprimento, Massa, Pressão e Temperatura"

Lisboa • Fevereiro de 2007

I&D INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

RELATÓRIO 58/07 – CIC

Caracterização Metrológica do Padrão de Referência de Humidade do LCAM/LNEC (Gerador de Humidade TSC 2500)

Resumo

Este relatório apresenta a caracterização metrológica do gerador de humidade TSC 2500, que constitui o padrão de referência da grandeza humidade relativa utilizado no âmbito da actividade metrológica desenvolvida pelo LCAM/LNEC. Neste, são referidos os aspectos mais relevantes associados às grandezas mensuráveis, ao princípio de funcionamento, aos modelos matemáticos aplicados, e à sua calibração e programação.

Metrological Characterization of the Humidity Reference Standard of LCAM/LNEC (Humidity Generator TSC 2500)

Abstract

This report presents a metrological characterization of the TSC 2500 humidity generator which constitutes the relative humidity reference standard used in the metrological activity of LCAM/LNEC. It mentions the main aspects related with the measurands, operation principle, mathematical models, calibration and programming.

Caractérisation Métrologique de l'Étalon de Référence d'Humidité du LCAM/LNEC (Générateur d'Humidité TSC 2500)

Résumé

Ce rapport présente une caractérisation métrologique du générateur d'humidité TSC 2500, qui constitue l'étalon de référence de la grandeur humidité relative utilisé dans l'activité développée par LCAM/LNEC. Il fait la description de cette grandeur et aussi du principe d'opération, modèle mathématique, étalonnage et programmation du générateur.

ÍNDICE

Índice de Matérias

1	INTRODUÇÃO	1
2	MEDIÇÃO DA HUMIDADE	3
2.1	Conceitos fundamentais	3
2.2	Parâmetros de caracterização do estado de saturação	7
2.3	Determinação da temperatura de ponto de orvalho	8
2.4	Hierarquia de métodos de medição de humidade	12
3	DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PADRÃO DE REFERÊNCIA DE HUMIDADE DO LCAM/LNEC (GERADOR DE HUMIDADE TSC 2500)	19
3.1	Princípio de funcionamento e descrição dos principais componentes	19
3.2	Modelos matemáticos aplicados	24
3.3	Recomendações do fabricante relativamente à calibração	27
3.4	Programação do controlador	28
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
	Anexo 1 – Especificações técnicas do gerador TSC 2500	35
	Anexo 2 – Descrição dos sistemas internos do gerador TSC 2500	36

1 INTRODUÇÃO

A actividade de laboratórios metrológicos dedicados à calibração e ao ensaio de instrumentos de medição depende da existência de padrões cujo nível de exactidão possa garantir a sua qualidade face aos requisitos das respectivas aplicações.

A instrumentação aplicada em estudos de investigação e em ensaios realizados pelo LNEC possui uma diversidade significativa no que concerne aos domínios e grandezas envolvidos. A humidade relativa é uma das grandezas cuja medição é comum, aplicando-se quer na monitorização de condições ambientais que influenciam os estudos e os ensaios quer como grandeza determinante para a quantificação de resultados obtidos no contexto dos próprios estudos (por exemplo, na avaliação do comportamento de materiais quando sujeitos a condições extremas de temperatura, pressão e humidade relativa).

Estas circunstâncias criaram a necessidade do LNEC dispor de padrões de referência de humidade relativa com a capacidade de se constituírem como elementos primários em cadeias de rastreabilidade. Este é o caso do gerador de humidade TSC 2500 (Thunder Scientific, modelo 2500) que, pelo facto de produzir numa câmara condicionada condições de referência desta grandeza e, simultaneamente, efectuar medições com elevado nível de exactidão, permite obter indicações de referência aplicáveis na calibração de diversos tipos de instrumentos de medição de humidade relativa e de temperatura de ponto de orvalho.

A natureza particular deste padrão impõe a necessidade de se efectuar uma análise mais detalhada dos principais aspectos relacionados com a sua caracterização metrológica, os quais, são essenciais para se maximizar o seu potencial e, também, para enquadrar a informação relevante visando a sua operação e a determinação das incertezas de medição.

Neste relatório, para além desta introdução, referem-se alguns conceitos e são apresentadas definições de grandezas relevantes na medição da humidade, as metodologias de medição de humidade que decorrem dos conceitos e definições apresentados, seguindo-se a descrição do gerador de humidade no que concerne aos aspectos relacionados com o seu funcionamento, os modelos matemáticos que aplica, as operações básicas de calibração e de programação, concluindo-se o documento com as considerações finais.

2 MEDIÇÃO DA HUMIDADE

2.1 Conceitos fundamentais

A humidade relativa pode-se definir, de acordo com a nomenclatura indicada no Vocabulário Internacional de Metrologia [1], como uma grandeza adimensional derivada (não integrada no Sistema Internacional – SI [2]), sendo adimensional por resultar de um rácio entre dois valores de pressão, e derivada por ser obtida a partir da grandeza pressão, ela própria uma grandeza derivada no contexto do SI.

A sua definição formal é a seguinte: *Grandeza mensurável equivalente ao rácio entre a quantidade de vapor de água no ar a determinada temperatura e a quantidade de vapor de água do ar saturado, expresso em $100 \cdot p/p_0$, onde p representa a pressão de vapor de água no ar e p_0 o ponto de equilíbrio da pressão de vapor de água à mesma temperatura*¹.

A referência ao termo “humidade”, isoladamente, pode ser ambígua, dado que este termo pode traduzir conceitos distintos (*humidade relativa*, *humidade absoluta* ou *humidade específica*), pelo que o seu estudo deve partir de um enquadramento prévio que conduza à diferenciação destes conceitos.

A abordagem adoptada parte da caracterização do *ar atmosférico* (constituente da *atmosfera terrestre*), identificando os seus elementos como um conjunto de componentes na fase gasosa (incluindo contaminantes) e vapor de água.

A definição de *ar seco* (*dry air*) traduz um estado particular em que os contaminantes e o vapor de água não se encontram presentes no ar atmosférico. Nessas condições, considera-se que a sua composição é relativamente constante (variando ligeiramente com o tempo, com a localização geográfica e com a altitude) [3], as percentagens aproximadas dessa composição por volume das suas componentes são, de acordo com [3]:

- 78,084 de nitrogénio;

¹ A definição formal desta grandeza é frequentemente apresentada indicando como argumentos da função a fracção molar de vapor de água em ar húmido e a fracção molar de vapor de saturação (*vide* a expressão 11), sendo esta via de realização e medição da grandeza um processo menos corrente e com maior grau de complexidade do que aquele que recorre ao controlo e à medição da grandeza pressão.

- 20,9476 de oxigénio;
- 0,934 de árgon;
- 0,0314 de dióxido de carbono;
- 0,001818 de néon;
- 0,000524 de hélio;
- 0,00015 de metano;
- 0 a 0,0001 de dióxido de enxofre;
- 0,00005 de hidrogénio;
- 0,0002 kripton, xénon, ozono e outros elementos ou moléculas.

Relativamente a esta composição (ou mistura), refira-se que a massa molecular relativa, tomando como base a escala do carbono-12, corresponde a 28,9645.

A combinação do *ar seco* com vapor de água origina uma outra definição: a de *ar húmido* (*moist air*). Esta mistura de duas componentes (por vezes designada por combinação binária) [3] ocorre numa gama alargada de combinações possíveis, desde a combinação em que a quantidade de vapor de água é nula (*ar seco*) até a combinação que contém uma quantidade máxima de vapor de água, dita de *saturação*.

A condição de *saturação* depende das variáveis temperatura e pressão, e reflecte um estado de equilíbrio neutro entre o *ar húmido* e as fases condensadas (líquida ou sólida) da água. Neste caso, a massa molecular relativa da água corresponde a 18,01528 (novamente, tomando como referência a escala de carbono-12).

A obtenção dos parâmetros que caracterizam a humidade resulta de uma análise das propriedades termodinâmicas da água no estado de saturação, para as quais foi estabelecido um conjunto de equações por Hyland e Wexler (em 1983) que são função da escala termodinâmica de temperatura (na gama compreendida entre -60 °C e $+200\text{ °C}$).

Nesta escala o ponto triplo da água tem um papel fundamental, por constituir a temperatura em que coexistem as 3 fases da substância (refira-se que, entre a temperatura de ponto triplo da água e as temperaturas críticas podem coexistir, em equilíbrio, as duas fases: líquido e vapor). O ponto triplo da água corresponde a 273,16 K ($0,01\text{ °C}$). Neste ponto fixo da escala termodinâmica considera-se que a entalpia e a entropia da água no estado líquido e saturada são iguais a zero.

As equações de Hyland e Wexler [3] têm como uma das variáveis de base a *pressão de saturação de vapor de água*. Esta variável tem uma aplicação particularmente importante no contexto da determinação do *rácio de humidade de saturação*, como se verá adiante.

Na referência citada, a fórmula empírica de determinação da *pressão de saturação* na gama compreendida entre -100 °C e 0 °C (incorporada na fase sólida da água), é dada por:

$$\ln(p_{ws}) = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6T^4 + C_7 \ln(T), \quad (1)$$

com,

$$C_1 = -5,674\,535\,9 \times 10^3;$$

$$C_2 = -5,152\,305\,8 \times 10^{-1};$$

$$C_3 = -9,677\,843\,0 \times 10^{-3};$$

$$C_4 = 6,221\,570\,1 \times 10^{-7};$$

$$C_5 = 2,074\,782\,5 \times 10^{-9};$$

$$C_6 = -9,484\,024\,0 \times 10^{-13};$$

$$C_7 = 4,163\,501\,9.$$

A fórmula empírica de determinação da *pressão de saturação* na gama compreendida entre 0 °C e $+200\text{ °C}$ (incorporada na fase líquida da água), é dada por:

$$\ln(p_{ws}) = \frac{C_8}{T} + C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13} \ln(T), \quad (2)$$

com,

$$C_8 = -5,800\,220\,6 \times 10^3;$$

$$C_9 = -5,516\,256\,0;$$

$$C_{10} = -4,864\,023\,9 \times 10^{-2};$$

$$C_{11} = 4,176\,476\,8 \times 10^{-5};$$

$$C_{12} = -1,445\,209\,3 \times 10^{-8};$$

$$C_{13} = 6,545\,967\,3.$$

A determinação do *rácio de humidade*, W , associado a uma amostra de *ar húmido*, resulta da sua definição como o *rácio da massa de vapor de água pela massa de ar seco contida na mesma amostra*:

$$W = \frac{M_w}{M_a}, \quad (3)$$

sendo equivalente a

$$W = 0,62189 \cdot \frac{x_w}{x_a}, \quad (4)$$

onde se multiplica o rácio de massas moleculares ($18,01528 / 28,9645 = 0,62198$) pelo rácio de fracções molares correspondentes.

Um outro conceito relevante é o de *humidade específica*, q , a qual é definida como o rácio de massa de vapor de água relativamente à massa total da amostra de *ar húmido*:

$$q = \frac{M_w}{(M_w + M_a)}. \quad (5)$$

Esta expressão pode ser determinada a partir do *rácio de humidade* dividindo ambos os termos pela massa de *ar seco*.

$$q = \frac{W}{(1+W)}. \quad (6)$$

A definição de *humidade absoluta* (também designada por *densidade de vapor de água*), d_v , é determinada pelo rácio da massa de vapor de água por volume total da amostra,

$$d_v = \frac{M_w}{V}. \quad (7)$$

Uma outra grandeza de interesse é a *densidade*, ρ , encontrando-se associada à mistura que constitui uma amostra de *ar húmido*, e determinando-se pelo rácio da massa total pelo volume total,

$$\rho = \frac{(M_w + M_a)}{V} = \left(\frac{1}{v}\right) \cdot (1+W). \quad (8)$$

Na expressão anterior, a grandeza v representa o volume específico de *ar húmido*, expresso em m^3/kg de *ar húmido*. Esta grandeza determina-se usando a seguinte expressão,

$$v = \frac{RT}{28,9645 \cdot (p - p_w)} = \frac{R_a T}{(p - p_w)}, \quad (9)$$

sendo $p = p_a + p_w$, sendo p a pressão total, p_a a pressão parcial do ar seco, p_w a pressão parcial do vapor de água e R a constante universal de gás, igual a $8314,41 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{mol}\cdot\text{K})$.

2.2 Parâmetros de caracterização do estado de saturação

O estado de *saturação* da amostra conduz a um conjunto complementar de grandezas a considerar no estudo da humidade.

O termo “*saturação*” exprime a condição em que a pressão parcial de vapor de água na amostra se encontra no seu nível máximo para a temperatura e pressão existentes. Quando esta condição se cumpre, estabelece-se o equilíbrio entre os estados líquido (ou sólido) e vapor da água, não se observando a presença de trocas devido à evaporação ou à condensação.

Assim sendo, conhecida a temperatura e a pressão de um determinado volume de ar, é possível obter as pretendidas grandezas associadas à saturação, como se expõe em seguida.

Define-se o *rácio de humidade saturada*, $W_s(T, p)$, como o rácio de humidade de ar húmido saturado relativamente à água no estado líquido (ou no estado sólido), quando esta se encontra à mesma temperatura T e pressão p .

Define-se o *grau de saturação*, μ , como o rácio que se estabelece entre o *rácio de humidade do ar*, W , e o *rácio de humidade do ar saturado*, W_s , à mesma temperatura e pressão,

$$\mu = \frac{W}{W_s} \Big|_{T,p} . \quad (10)$$

A *humidade relativa* ϕ traduz o rácio entre a fracção molar de vapor de água (numa amostra de ar húmido), x_w , e a fracção molar de uma amostra de ar saturado, x_{ws} , encontrando-se ambas à mesma temperatura e pressão,

$$\phi = \frac{x_w}{x_{ws}} \Big|_{T,p} . \quad (11)$$

A relação que se estabelece entre a humidade relativa e o grau de saturação é:

$$\mu = \frac{\phi}{1 + (1 - \phi) \cdot W_s / 0,62198} . \quad (12)$$

É habitual representar a humidade relativa em valor percentual, de acordo com a definição da grandeza apresentada inicialmente, e usando-se a designação *hr*. A expressão que a traduz é a seguinte:

$$hr = \left(\frac{x_w}{x_{ws} \Big|_{T,p}} \times 100 \right) \% . \quad (13)$$

O ar atmosférico pode ser encarado como uma mistura gasosa existente num dado volume a uma determinada temperatura, onde cada componente é visto como um gás ideal que apresenta um comportamento igual ao que teria caso estivesse sozinho no mesmo volume e à mesma temperatura da mistura (modelo de Dalton). Isso permite que se possa exprimir a humidade relativa, também, em termos percentuais pela seguinte expressão:

$$hr = \left(\frac{p_w}{P_{ws} \Big|_{T,p}} \times 100 \right) \% . \quad (14)$$

A *temperatura de ponto de orvalho*, t_d , indica a temperatura do *ar húmido* saturado à mesma pressão p e com o mesmo rácio de humidade W que o da amostra de *ar húmido* sob observação. Numa descrição prática, é habitual associar a temperatura de ponto de orvalho ao valor da temperatura a que se deve arrefecer uma amostra de ar (ou de outro gás) para que esta atinja o estado de saturação relativamente à água. A sua obtenção resulta da resolução de uma equação implícita, cuja forma é a seguinte:

$$W_s(p, t_d) = W . \quad (15)$$

A *temperatura termodinâmica de bolbo-húmido*, T^* , corresponde à temperatura para a qual a água (no seu estado líquido ou sólido), por evaporação (sublimação, no estado sólido) para o ar húmido a uma *temperatura de bolbo-seco* T e *rácio de humidade* W , permite atingir a saturação do ar de forma adiabática, à mesma temperatura T^* mantendo a pressão constante.

2.3 Determinação da temperatura de ponto de orvalho

A determinação da temperatura de ponto de orvalho, importante no contexto da definição primária da grandeza humidade, por resultar de uma relação funcional implícita, envolve algumas dificuldades de ordem prática.

Com efeito, essa circunstância determinou o desenvolvimento de diversos processos empíricos visando estabelecer metodologias para a sua obtenção. Alguns destes têm sido

objecto de estudo promovendo-se, em seguida, uma apresentação breve das expressões e parâmetros envolvidos.

- Fórmula de **Tetens** (publicada em *Über einige meteorologische Begriffe. Zeitschrift für Geophysik*, Vol. 6 – 297, 1930):

$$t_d = \frac{241,88 \times \ln\left(\frac{p_w}{610,78}\right)}{17,558 - \ln\left(\frac{p_w}{610,78}\right)}, \quad (16)$$

onde t_d representa a *temperatura de ponto de orvalho*, em °C, e p_w corresponde à pressão parcial de vapor de água, expressa em Pa.

- Fórmula de **Magnus** (publicada em Sonntag D. – *Important New Values of the Physical Constants of 1986, Vapour Pressure Formulations based on the ITS-90 and Psychrometer Formulae. Z. Meteorol.*, 70 (5), 1990. pp. 340-344):

$$t_d = \frac{\lambda \cdot \left(\ln\left(\frac{hr}{100}\right) + \frac{\beta \cdot t}{\lambda + t} \right)}{\beta - \left(\ln\left(\frac{hr}{100}\right) + \frac{\beta \cdot t}{\lambda + t} \right)}, \quad (17)$$

onde t_d representa a *temperatura de ponto de orvalho*, em °C, hr exprime a humidade relativa em percentagem, t corresponde à temperatura de ensaio, em °C, e os parâmetros λ e β que assumem os valores numéricos 243,12 e 17,62, respectivamente, na condição de equilíbrio sobre água. Considera-se que esta expressão é válida para temperaturas compreendidas entre –45 °C e 60 °C.

- Expressão de **Berry** (publicada em Berry F. – *Handbook of Meteorology*. McGraw-Hill Book Company, 1945. p. 343):

$$t_d = \frac{0,66077 - \log(p_{ws}) \times 237,3}{\log(p_{ws}) - 8,16077}, \quad (18)$$

onde t_d é a *temperatura de ponto de orvalho*, em °C e p_{ws} é a pressão de saturação do vapor relativa à água, dada pela seguinte expressão:

$$\log(p_{ws}) = 0,66077 + \frac{7,5 t}{237,3 + t} + \log(hr) - 2, \quad (19)$$

onde t corresponde à temperatura de ensaio, em °C, e hr exprime a humidade relativa em percentagem.

- Fórmula de **Peppers** [3]:

$$t_d = C_{14} + C_{15} \cdot \alpha + C_{16} \cdot \alpha^2 + C_{17} \cdot \alpha^3 + C_{18} \cdot (p_w)^{0,1984}, \quad (20)$$

onde t_d representa a *temperatura de ponto de orvalho*, em °C, p_w representa a pressão parcial de vapor de água, em kPa e:

$$\alpha = \ln(p_w);$$

$$C_{14} = 6,54;$$

$$C_{15} = 14,526;$$

$$C_{16} = 0,7389;$$

$$C_{17} = 0,09486;$$

$$C_{18} = 0,4569.$$

Considera-se que esta expressão é válida para temperaturas entre 0 °C e 93 °C.

- Fórmula de **Hardy** [4]:

$$T_d = \frac{\sum_{i=0}^3 c_i (\ln p_w)^i}{\sum_{i=0}^3 d_i (\ln p_w)^i}, \quad (21)$$

onde T_d representa a *temperatura de ponto de orvalho*, em K, p_w representa a pressão parcial de vapor de água, em Pa, e os coeficientes c_i e d_i apresentam os seguintes valores:

$$c_0 = 2,0798233 \times 10^2;$$

$$c_1 = -2,0156028 \times 10^1;$$

$$c_2 = 4,6778925 \times 10^{-1};$$

$$c_3 = -9,2288067 \times 10^{-6};$$

$$d_0 = 1;$$

$$d_1 = -1,3319669 \times 10^{-1};$$

$$d_2 = 5,6577518 \times 10^{-3};$$

$$d_3 = -7,5172865 \times 10^{-5}.$$

Estas fórmulas admitem variantes, uma das quais é o método iterativo de cálculo da temperatura de ponto de orvalho, obtido a partir da fórmula de **Wexler** para a pressão de saturação (publicada em Wexler, A. – *Vapor Pressure Formulation for Water in Range 0 °C to 100 °C. A revision.* Journal of Research of the National Bureau of Standards – A. Physics and Chemistry, September – December 1976, Vol. 80A, N. 5 e 6. pp. 775-785).

A fórmula de Wexler para a pressão de saturação do vapor sobre água é válida para as temperaturas compreendidas entre 0 °C e 100 °C:

$$\ln(p_{ws}) = \sum_{i=0}^6 g_i T^{i-2} + g_7 \ln(T), \quad (22)$$

onde p_{ws} corresponde à pressão de saturação do vapor de água, em Pa, T representa a temperatura expressa em K, e as constantes g_i possuem os seguintes valores numéricos:

$$g_0 = -2,9912729 \times 10^3;$$

$$g_1 = -6,0170128 \times 10^3;$$

$$g_2 = 1,887643854 \times 10^1;$$

$$g_3 = -2,8354721 \times 10^{-2};$$

$$g_4 = 1,7838301 \times 10^{-5};$$

$$g_5 = -8,4150417 \times 10^{-10};$$

$$g_6 = 4,4412543 \times 10^{-13};$$

$$g_7 = 2,858487.$$

Sabendo que a definição da temperatura de ponto de orvalho determina que esta se possa traduzir como *a temperatura a que a pressão parcial do vapor é igual à pressão de saturação*, conhecendo o valor da pressão parcial p_w a uma temperatura T (dada pelo produto da humidade relativa pela pressão de saturação à mesma temperatura T), procura-se obter o zero da função f a partir da seguinte expressão:

$$f(T) = p_{ws}(T) - p_w = 0. \quad (23)$$

A solução desta igualdade determina a temperatura de ponto de orvalho, $T = T_d$. A resolução desta relação implícita resulta da aplicação do método numérico de Newton [5], cujas etapas são sumariamente descritas a seguir.

- a. Estabelecer a hipótese inicial correspondente a um valor de temperatura de ponto de orvalho, T_0 .
- b. Realizar n iterações até se verificar a convergência dos valores obtidos usando a relação:

$$T_{n+1} = T_n - \frac{f(T_n)}{f'(T_n)} \quad (24)$$

onde f' representa a primeira derivada da função f considerada.

2.4 Hierarquia de métodos de medição de humidade

Actualmente são conhecidos diversos métodos aplicáveis na medição da humidade [6,7], aos quais se associa, em geral, alguns tipos de equipamentos característicos. Estes recorrem a princípios e formas de transdução das grandezas que se distinguem significativamente, podendo efectuar-se um agrupamento considerando quer a metodologia quer o tipo de equipamento que a aplica. Os grupos que se apresentam a seguir (aplicáveis na medição de humidade em amostras de misturas no estado gasoso) traduzem essa diferenciação.

▪ Método gravimétrico

A determinação da quantidade de vapor de água presente numa amostra resulta da sua congelação ou absorção por intermédio de uma substância química dessecante, sendo de seguida efectuada a sua pesagem enquanto que o volume ou a massa de gás seco são medidos de forma directa. Este método é caracterizado por uma elevada exactidão (0,1 % a 0,2 % no rácio de mistura e 0,04 °C na temperatura de ponto de orvalho, admitindo valores de temperatura compreendidos entre – 35 °C a + 50 °C). Este método constitui a forma de mais elevado grau de exactidão e, como tal, de referência.

- **Método dos dois caudais, das duas temperaturas ou das duas pressões (Gerador de humidade)**

O suporte do desenvolvimento deste método consiste em gerar condições de humidade relativa presente numa câmara de ensaio mediante o controlo das grandezas de influência (temperatura, pressão ou caudal) em dois estados distintos do ar (seco e saturado).

O gerador de humidade é um tipo de equipamento que actua sobre as variáveis (temperatura, pressão e caudal) que determinam a humidade no interior da referida câmara, sendo o seu funcionamento baseado num dos seguintes métodos:

- método dos dois caudais – a câmara de ensaio é alimentada por dois caudais de ar distintos, um de ar seco e outro de ar saturado com vapor de água a uma temperatura conhecida, sendo a humidade determinada a partir dos valores de medição dos caudais;
- método das duas temperaturas – o método envolve a utilização de ar previamente saturado com vapor de água a uma temperatura conhecida sendo aquecido, de seguida, até atingir uma temperatura superior, determinando-se a humidade a partir da relação entre estas duas temperaturas;
- método das duas pressões – o processo associado a este método promove uma saturação do ar com vapor de água a uma pressão elevada, impondo de seguida uma expansão isotérmica para uma pressão mais baixa (em geral para a pressão atmosférica); a determinação da humidade resulta da medição da pressão e da temperatura em ambas as fases.

Considera-se que este método permite atingir um grau de exactidão comparável à do método gravimétrico e, como tal, pode ser apontado como método de referência.

- **Método de medição da temperatura de ponto de orvalho (Higrómetro de espelho)**

Este método consiste na determinação da temperatura de ponto de orvalho mediante o arrefecimento de uma superfície em contacto com o ar, mantendo a pressão e a humidade relativa aproximadamente constantes, alcançando-se assim, na região arrefecida, a saturação do ar. O higrómetro de espelho é o equipamento de referência para a aplicação deste método, no qual se promove a introdução da amostra de ar recolhida para uma região onde se encontra um espelho metálico arrefecido por um processo termoeléctrico. Quando o espelho

atinge a temperatura de ponto de orvalho origina a formação de gotas de orvalho na sua superfície detectáveis através de meios ópticos (tipicamente, pela deflexão de um feixe LASER alinhado com um alvo fixo).

Uma alternativa menos comum consiste em utilizar, em substituição do espelho, uma substância inerte, sendo a formação do orvalho detectada pela medição de grandezas eléctricas ou pelo recurso a ondas acústicas. A medição da temperatura do espelho ou da substância inerte no momento da detecção de orvalho define a grandeza temperatura de ponto de orvalho, apontando-se um grau de exactidão que, geralmente, se situa entre os 0,5 °C e 1 °C, sendo particularmente indicado como método de transferência.

- **Método psicrométrico (Psicrómetro)**

Esta metodologia tem como suporte a medição efectuada por dois termómetros, os quais são imersos num meio onde se promove a ventilação da amostra de ar cuja humidade relativa se pretende determinar. Um dos termómetros é designado de “bolbo seco” (referência determinada pela utilização de termómetros de dilatação de líquido-em-vidro) e destina-se à medição da temperatura da amostra, t , enquanto que o outro, designado de “bolbo húmido”, encontra-se envolvido numa matéria absorvente húmida (tecido, algodão ou outra) em contacto com água (o mais purificada possível) contida num reservatório. A pressão do vapor p_w da amostra é determinada pela energia necessária à evaporação da água da matéria absorvente para o ar envolvente, o que provoca o arrefecimento do bolbo húmido para uma temperatura t_{ws} . A relação entre estas grandezas é expressa pela equação psicrométrica:

$$p_w = p_{ws} - Ap(t - t_{ws}), \quad (25)$$

onde p_{ws} é a pressão de saturação do vapor à temperatura t_{ws} , p é a pressão atmosférica e A representa o coeficiente psicrométrico, o qual varia com a velocidade de ventilação, as dimensões do bolbo húmido e as trocas de calor por radiação entre ambos os bolbos e a região envolvente. Este tipo de equipamento considera-se, habitualmente, como padrão de trabalho.

- **Método de alongação mecânica de materiais (Higrómetro mecânico)**

Este método tem como princípio de funcionamento o efeito de alongação que a humidade provoca em materiais como o cabelo humano, têxteis ou fibras de polímeros.

Efectuando-se a amplificação mecânica deste fenómeno, é possível efectuar a transdução da grandeza para um movimento mecânico de um registador (caneta associada a um registo de papel). O grau de exactidão deste tipo de equipamentos (de trabalho) é da ordem de 2 % a 3 % de humidade relativa, sendo comum atingir valores de exactidão próximos dos 5 %.

- **Método de medição da temperatura de ponto de orvalho com cloreto de lítio**

Este tipo de método para se efectuar a medição da temperatura de ponto de orvalho envolve a utilização de um material absorvente (tecido) embebido numa solução de cloreto de lítio, sendo colocado entre dois eléctrodos. O cloreto de lítio possui propriedades higroscópicas, i.e., dispõe de uma capacidade intrínseca de absorção de água existente no ar atmosférico.

A passagem de uma corrente alterna entre os dois eléctrodos origina um aumento de temperatura de tal forma que se inicia um fenómeno de evaporação de água presente no material absorvente. Com a consequente secagem do material absorvente, decresce a passagem de corrente eléctrica até ao mínimo (a resistência eléctrica do material seco é consideravelmente elevada) terminando assim a fase de aquecimento e iniciando-se o arrefecimento e a absorção de água do ar circundante.

Este ciclo é efectuado até se atingir um ponto de equilíbrio a uma temperatura característica que permite obter a temperatura de ponto de orvalho. A gama de medição da temperatura situa-se, tipicamente, entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$, permitindo atingir um grau de exactidão compreendido entre $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- **Método eléctrico (Sensores resistivos ou capacitivos)**

Esta metodologia incorpora cadeias de medição onde o elemento sensor ligado aos elementos de transdução pode ser de dois tipos: resistivos ou capacitivos.

O funcionamento do sensor resistivo baseia-se no facto de existir uma relação entre a humidade e a resistência/impedância do meio higroscópico, distinguindo-se nesta categoria duas configurações distintas: sensores *Dunmore*, os quais utilizam uma solução diluída de cloreto de lítio envolvendo um substrato isolante revestido com acetato polivinílico; e os sensores *Pope*, usando um substrato de poliestireno que é, ele próprio, o elemento sensível à grandeza mensurável.

O sensor capacitivo tem um princípio de funcionamento que resulta de existir uma relação entre a humidade e a capacitância de uma fina camada polimérica ou de óxido metálico colocado entre dois eléctrodos. A variação produzida é mensurável e fornece o sinal para a transdução da grandeza.

- **Método do óxido de alumínio**

Este método recorre à utilização de uma folha ou fio de alumínio cuja anodização cria uma camada fina com poros sensíveis a água, sobre a qual se encontra depositado um filme condutor de ouro permeável à água. O raio dos poros tem uma dimensão apropriada para que o sensor seja adequado à passagem de moléculas de água, podendo estabelecer-se uma relação entre a quantidade absorvida de água e a temperatura de ponto de orvalho da amostra observável. Esta temperatura é obtida com base na variação de capacidade medida entre a base de alumínio e o eléctrodo de ouro.

A exactidão atribuída a este método varia entre 1 °C para temperaturas de ponto de orvalho mais elevadas e 3 °C para temperaturas negativas até – 100 °C.

- **Método electrolítico (Higrómetro electrolítico)**

Este método, também conhecido como método de medição coulométrico, admite um princípio que resulta da absorção de água integrante de uma amostra de ar por uma camada de pentóxido de fósforo. A água absorvida é sujeita a uma electrólise o que, de acordo com a Lei de Faraday, origina uma corrente eléctrica com uma magnitude bem definida que é mensurável, servindo como elemento de comparação com a humidade relativa presente na amostra sob observação.

- **Método do oscilador de cristal**

Este método tem como suporte a utilização de um cristal de quartzo cuja superfície se encontra revestida por uma substância higroscópica. O seu princípio de funcionamento baseia-se no facto da frequência de ressonância do cristal ser função da massa do revestimento e, portanto, depender também da humidade presente na amostra gasosa que o envolve. O cristal é alternadamente exposto a amostras húmida e seca, sendo efectuada a medição da variação da frequência de ressonância.

- **Método de Infra-Vermelhos (IV)**

O método de IV utiliza o conhecimento de que o vapor de água absorve radiação electromagnética na região dos IV. Assim, se uma amostra gasosa for conduzida por um caminho óptico estabelecendo contacto, nesse trajecto, com o trajecto estabelecido entre uma fonte de IV e um detector, observa-se uma redução da radiação transmitida que é proporcional à presença de moléculas de água presente na intersecção dos dois trajectos. Existem diversos equipamentos de medição baseados neste método, os quais diferem entre si essencialmente pelo tipo de fonte e de detector utilizados.

- **Método de condutividade térmica**

Este tipo de metodologia baseia-se na medição da diferença de condutividade térmica entre o ar seco e o ar húmido utilizando, para o efeito, dois termistores que se encontram ligados a uma ponte de medida.

As descrições que foram apresentadas permitem evidenciar que as diferentes metodologias aplicadas na medição de humidade (por via directa, da humidade relativa, ou indirecta, da pressão, temperatura, caudal e temperatura de ponto de orvalho e outras) conduzem a níveis de exactidão distintos, permitindo estabelecer uma hierarquia de padrões subjacente ao estabelecimento de cadeias de rastreabilidade associadas à medição e à calibração da grandeza em causa.

Com efeito, essa hierarquia admite como **padrões de referência** os higrómetros que se baseiam quer no método gravimétrico quer os geradores de humidade (de duas pressões, duas temperaturas ou dois caudais), como **padrão de transferência** o higrómetro de espelho, e os restantes são considerados, em regra, como **padrões de trabalho**.

Refira-se, adicionalmente, a possibilidade de utilização de outro tipo de padrões que, embora não efectuem a medição da grandeza, podem ser considerados como **padrões de referência**. Estes padrões são vulgarmente conhecidos como *amostras de referência de humidade relativa*, sendo constituídas por misturas calibradas (por lotes) de substâncias em fase líquida que, quando colocadas num material absorvente em pequenas câmaras de calibração acopladas a sensores e em contacto com o ar, combinam-se produzindo uma fase gasosa com uma humidade relativa determinada e certificada. Estas amostras enquadram-se no que se designa por “materiais de referência”, podendo ser utilizados, nomeadamente, na calibração de cadeias de medição que integram sensores resistivos e capacitivos.

Conforme se pode constatar, existe uma extensa variedade de métodos associados à medição da humidade relativa e da temperatura de ponto de orvalho, pelo que a selecção de uma determinada via requer uma ponderação de diversos factores, destacando-se:

- a gama de operação requerida;
- o ambiente de exposição a que o elemento sensor é sujeito (por exemplo, agressividade do meio, possibilidade de contaminação e/ou de condensação);
- o grau de exactidão requerido;
- o tempo de resposta;
- a frequência de utilização e de calibração;
- o custo de aquisição e manutenção.

A constituição de cadeias de rastreabilidade e, em particular, a posição que a diferente instrumentação ocupa nessas cadeias, depende das características metrológicas da instrumentação envolvida. A hierarquia que se estabelece é fundamental para a selecção de padrões e para a elaboração dos procedimentos de calibração desenvolvidos. No contexto dos laboratórios metrológicos este aspecto é fulcral para o apropriado desempenho da sua actividade.

No caso particular do LNEC, onde se encontra instrumentação dentro da diversidade descrita acima, a concretização das necessárias calibrações periódicas é da responsabilidade do Laboratório Central de Apoio Metrológico (LCAM/LNEC) inserido no Núcleo de Qualidade Metrológica (NQM) do Centro de Instrumentação Científica (CIC). Para responder a esta responsabilidade, o LCAM/LNEC dispõe de um gerador de humidade TSC 2500 que utiliza o método das duas pressões, o qual constitui o padrão de referência do laboratório e, conseqüentemente, o padrão de referência do LNEC no que concerne à instrumentação para medição de humidade relativa cuja rastreabilidade se estabelece relativamente ao LCAM/LNEC.

Esta circunstância, associada ao grau de complexidade associado à sua operação, e a necessidade de se obter o mais elevado grau de exactidão, determinam a importância relativa deste equipamento e constituem argumentos para a elaboração deste relatório e para a descrição detalhada que se apresenta no próximo capítulo.

3 DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PADRÃO DE REFERÊNCIA DE HUMIDADE DO LCAM/LNEC (GERADOR DE HUMIDADE TSC 2500)

3.1 Princípio de funcionamento e descrição dos principais componentes

Dos diversos métodos experimentais existentes actualmente para a medição da humidade destacam-se, em particular, os geradores de humidade pela sua funcionalidade de padrão primário na calibração de equipamentos de medição de humidade. No caso particular deste equipamento o método utilizado é o das duas pressões, conforme a caracterização efectuada no capítulo 2.

Sendo apontado como um dos métodos com maior grau de exactidão na geração de humidade, o método das duas pressões foi aplicado na concepção e desenvolvimento deste equipamento pelo NBS (*National Bureau of Standards* hoje designado por NIST – *National Institute of Standards and Technology*), onde Weaver e Riley criaram, em 1948, um protótipo destinado a gerar e a controlar a humidade numa câmara de condicionamento [8].

O princípio de funcionamento consistia na saturação de ar ou de outro gás com vapor de água a uma pressão elevada, seguindo-se uma fase de expansão até atingir uma determinada pressão inferior a temperatura constante. Em 1951, Wexler e Daniels (NBS) promoveram modificações no equipamento desenvolvido a partir do protótipo, designadamente, pela introdução de um componente dedicado ao controlo da temperatura, essencial para se atingir um desempenho apropriado visando a medição das grandezas temperatura e pressão (determinantes para o cálculo da humidade relativa).

Actualmente, os geradores de humidade pelo método das duas pressões, nomeadamente o TSC 2500 (fig. 1), são o resultado dos sucessivos desenvolvimentos e aperfeiçoamentos tecnológicos desse equipamento original.

A configuração esquemática dos componentes do gerador de humidade encontra-se na figura 2 (baseada em [8]), servindo de base para a subsequente descrição dos seus elementos mais importantes.

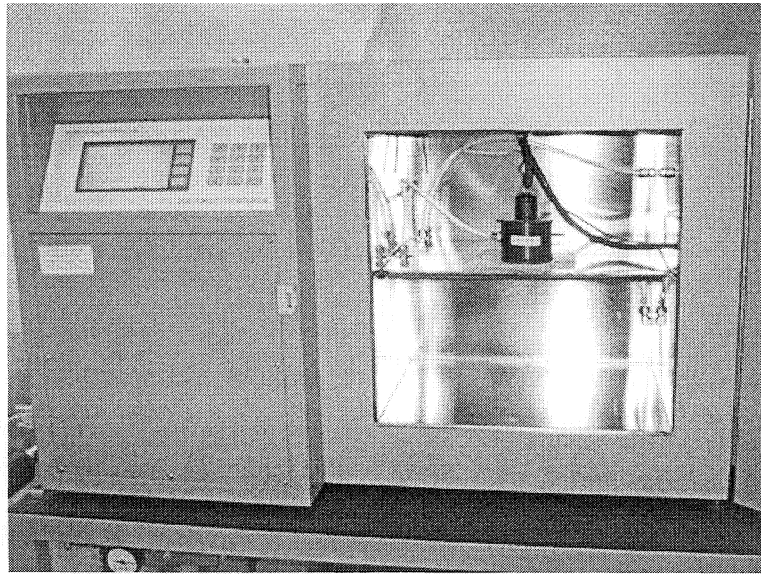


Figura 1: Gerador de humidade TSC 2500.

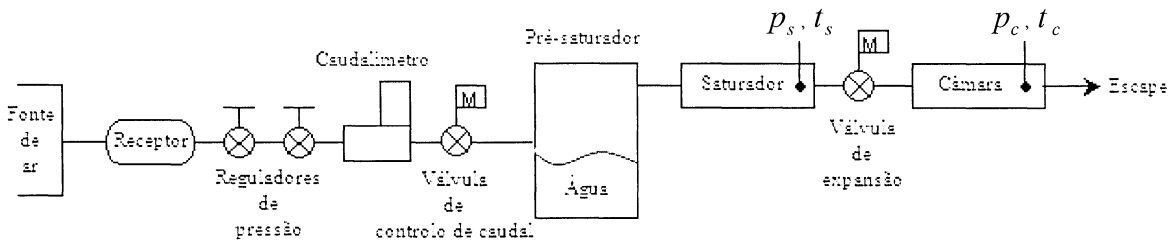


Figura 2: Constituição esquemática do gerador de humidade TSC 2500.

Na origem do esquema encontra-se um dos elementos fundamentais para o funcionamento do processo, a **fonte de ar comprimido**, cuja pressão de referência é aproximadamente de 1207 kPa o que, no caso específico, se traduz na utilização de um sistema de ar comprimido, modelo ACS-517B da *Thunder Scientific Corporation*.

Com a fonte de ar em funcionamento, o fluxo de ar é dirigido para o **receptor** do gerador, sendo condicionado pela acção de dois **reguladores de pressão**, que actuam efectuando uma regulação da pressão para valores próximos de 1034 kPa.

Na fase seguinte, o fluxo de ar alcança o **caudalímetro** e a **válvula de controlo de caudal**, cuja acção permite condicionar o caudal de ar a inserir na câmara do gerador de humidade. Tipicamente, o caudal de ar de referência encontra-se compreendido entre 2 L/min e 20 L/min, notando-se que este parâmetro tem relevância no processo de

uniformização e estabilização não sendo relevante no que concerne ao valor de humidade relativo gerado.

Numa fase posterior, o fluxo de ar é introduzido num componente designado por **pré-saturador**, o qual tem a configuração de um cilindro vertical contendo um reservatório com água a uma temperatura 10 °C a 20 °C acima do valor da temperatura de saturação que se pretende obter. O fluxo de ar é introduzido no pré-saturador através de uma tubagem de serpentina imersa na água, formando assim um permutador de calor.

O fluxo do ar na tubagem permite que este atinja a temperatura do pré-saturador. O ar que sai da tubagem é, então, encaminhado para a superfície da água, de forma a gerar um fluxo de ar com agitação circular no pré-saturador permitindo que o ar continue a ser aquecido e que, simultaneamente, possa adquirir o estado de saturação com vapor de água equivalente a um valor de humidade relativa próximo de 100 %.

Após a saturação, o ar alcança o **saturador**, que funciona como um permutador de calor, mantido a uma temperatura igual à temperatura de saturação pretendida.

O fluxo de ar com aproximadamente 100 % de humidade relativa atravessa o saturador, verificando-se a diminuição da sua temperatura e, conseqüentemente, a formação do ponto de orvalho (condição de saturação a 100 %). É este contínuo arrefecimento até à temperatura de saturação pretendida, que possibilita a garantia da condição de saturação máxima, acompanhada da condensação da água em excesso. A medição da pressão no saturador, p_s , e da temperatura do ar, t_s , é efectuada nesta fase de saturação, imediatamente antes da saída do fluxo de ar do saturador. Nesta saída, o fluxo de ar encontra uma **válvula de expansão** que controla a sua passagem para a câmara de ensaio cuja pressão é, p_c .

A válvula de expansão encontra-se isolada termicamente visando promover uma expansão isotérmica verificando-se, na prática, que ocorre uma expansão adiabática, com a massa de ar a realizar trabalho sobre a válvula não existindo trocas de calor com o exterior. Observa-se assim, uma diminuição da energia interna da massa de ar, o que se traduz na diminuição da sua temperatura. Deste modo, é promovido o **aquecimento** da válvula de modo a se manter a temperatura do ar acima da temperatura do seu ponto de orvalho.

No caso da temperatura do ar ou da válvula atingirem valores inferiores à temperatura de ponto de orvalho, ocorre o fenómeno de condensação, provocando uma alteração indesejável da humidade relativa presente na câmara.

Refira-se que o efeito de arrefecimento da válvula associado à expansão adiabática pode ser compensado pelas trocas de calor com um fluido circulante (mistura de água e propileno de glicol) na região pós expansão imediatamente anterior à câmara de ensaio.

No final do percurso, o fluxo de ar atinge a **câmara de ensaio**, onde se procede à medição da sua pressão, p_c , e da sua temperatura, t_c , verificando-se que, pelo facto da sua exaustão se processar para o meio ambiente envolvente, a pressão observada apresenta valores próximos da pressão atmosférica exterior.

O controlo do processo de geração de humidade descrito anteriormente é assegurado por um **sistema de controlo computadorizado (scc)**, incorporado no próprio gerador de humidade. Este sistema de controlo possui como funções principais:

- a medição e o controlo dos parâmetros envolvidos do processo de geração de humidade (temperatura, pressão e caudal);
- a recolha e arquivo da configuração/parametrização de entrada (definida pelo operador do sistema);
- o processamento e cálculo de parâmetros envolvidos no processo de geração de humidade relativa;
- a apresentação de informação;
- o estabelecimento de ligações a equipamento periférico (computadores, impressoras, sistemas de aquisição contínua, etc.), através de uma porta de interface bidireccional do tipo RS-232C.

Destas funções, tem particular importância o controlo de temperatura e pressão, condicionando o seu nível de exactidão.

O controlo da temperatura é assegurado pelo **scc** que actua sobre uma mistura de água e propileno glicol circulante na proximidade do saturador e da câmara de ensaio. Desta forma, é possível manter a temperatura desde os 0 °C até aos 70 °C utilizando-se, para o efeito, um algoritmo de base PID (Proporcional-Integral-Derivativo) que efectua as seguintes operações:

- diferença entre a temperatura medida e a temperatura pretendida (proporcional);

- taxa actual de variação da temperatura (derivativo);
- somatório, ao longo do tempo, das diferenças entre as temperaturas referidas anteriormente (integral).

Cada um dos resultados destes cálculos é multiplicado por um factor de ponderação, sendo o seu conjunto total somado, obtendo-se um valor numérico designado por PID de saída que representa, para um dado instante, a percentagem requerida da capacidade total de aquecimento ou arrefecimento disponível. Este valor é calculado a uma taxa de aproximadamente 1/s, permitindo determinar o tempo que um dado elemento de aquecimento deve estar activo ou, então, o tempo que uma determinada válvula electromecânica deverá deixar actuar um fluido refrigerante durante cada intervalo de 1 s.

O aquecimento do fluido resulta da actuação de uma resistência eléctrica de imersão existente no circuito por onde este circula enquanto que o seu arrefecimento é obtido pela acção de um permutador de calor, também ele inserido no circuito. Este permutador é parte integrante de um sistema fechado de refrigeração que inclui um compressor responsável pela injeção de um líquido refrigerante (R-134A), a alta pressão, no sistema. Este processo visa assegurar um controlo efectivo da temperatura do fluido, permitindo a sua estabilização à temperatura de saturação com uma variação da ordem de 0,02 °C.

A temperatura do pré-saturador é controlada de um modo semelhante, sendo o seu aquecimento garantido mediante o uso de resistências eléctricas imersas no meio.

No que se refere ao controlo da pressão, este é assegurado pelo mesmo **scc**, o qual efectua o controlo do conjunto de válvulas electromecânicas cuja posição é determinada por algoritmos PID. O gerador de humidade possui dois transdutores de pressão: um, dedicado à medição de pressões de gama baixa observadas no saturador e na câmara de ensaio; e outro, utilizado para medição de pressões de uma gama mais elevada. A utilização partilhada do transdutor de pressão dedicada à medição de pressões de gama baixa no saturador e na câmara de ensaio visa minimizar o efeito de deriva dupla, que é observado em sistemas com dois transdutores aplicados individualmente nestas medições.

A terceira grandeza envolvida, o caudal associado ao fluxo de ar, é sujeita a um controlo promovido pelo **scc**, o qual actua sobre um conjunto de válvulas electromecânicas utilizando, para o efeito, um algoritmo PID semelhante aos referidos anteriormente.

Em anexo a este documento, apresentam-se as especificações técnicas do equipamento estudado, assim como uma descrição detalhada dos vários sistemas que o constituem e a forma como se encontram organizados.

3.2 Modelos matemáticos aplicados

De acordo com os conceitos apresentados anteriormente, relacionados com a grandeza humidade relativa e expressos pelas equações (11), (12) e (13), podemos definir a fracção molar de vapor de água presente numa amostra de ar como:

$$x_w = \frac{p_w}{p}, \quad (26)$$

onde p_w é a pressão parcial que o vapor de água exerce isoladamente na amostra de ar e p é a pressão total exercida pelo ar, a qual (de acordo com o modelo de Dalton para misturas gasosas) é igual à soma das pressões parciais exercidas pelo vapor de água e pelos restantes componentes gasosos constituintes do ar.

Relembra-se também que, quando uma amostra de ar atinge a saturação com vapor de água, a pressão parcial exercida pelo vapor de água, $p_{ws}(t)$, é uma quantidade bem conhecida e definida como a pressão de saturação do ar a uma dada temperatura t . Nesta situação, a fracção molar do vapor de água pode ser escrita como:

$$x_{ws} = \frac{p_{ws}(t)}{p}. \quad (27)$$

No caso específico da câmara de ensaio do gerador, caracterizada por uma pressão total p_c e uma temperatura t_c , a fracção molar do vapor de água de uma amostra de ar saturada será expressa por:

$$x_{ws} = \frac{p_{ws}(t_c)}{p_c}. \quad (28)$$

A fracção molar de vapor de água da amostra de ar que pode existir na câmara de ensaio à pressão p_c , e à temperatura t_c , é dada por:

$$x_w = \frac{p_w}{p_c}, \quad (29)$$

o que, na determinação numérica da humidade relativa através da expressão (13), implica a necessidade de medição da pressão parcial do vapor de água.

No gerador de humidade este requisito é evitado, tendo em conta que o número de moléculas de cada um dos componentes gasosos constituintes do ar permanece constante independentemente da pressão ou temperatura, desde de que estas grandezas não provoquem uma mudança de estado físico, permitindo a modificação da expressão (29) para a seguinte forma:

$$x_w = \frac{p_w}{p_c} = \frac{p_{ws}(t_s)}{p_s}, \quad (30)$$

observando-se que esta é função da pressão p_s e da temperatura t_s no saturador. Esta expressão pressupõe que este promove a saturação completa do fluxo de ar de forma eficaz.

As equações (28) e (30), permitem expressar a humidade relativa da seguinte forma:

$$hr = \left(\frac{p_{ws}(t_s)}{p_{ws}(t_c)} \times \frac{p_c}{p_s} \times 100 \right) \%. \quad (31)$$

Nesta, considera-se o ar como um gás ideal, hipótese que na realidade não se verifica dado o comportamento não linear do ar enquanto mistura gasosa constituída por vários componentes com compressibilidades diferentes. Deste modo, é forçoso incluir o efeito decorrente dessa situação no modelo matemático, o que se consegue substituindo as pressões de saturação $p_{ws}(t_s)$ e $p_{ws}(t_c)$, pelas respectivas pressões de saturação efectivas, $p_{ws}'(p_s, t_s)$ e $p_{ws}'(p_c, t_c)$ que se exprimem da seguinte forma:

$$p_{ws}'(p, t) = f_{ws}(p, t) p_{ws}(t), \quad (32)$$

onde $f_{ws}(p, t)$ corresponde ao *factor de ajustamento* (trad. livre de *enhancement factor*) para o ar húmido, à pressão, p , e temperatura, t . Assim, a expressão final para cálculo da humidade relativa é:

$$hr = \frac{f_{ws}(p_s, t_s)}{f_{ws}(p_c, t_c)} \frac{p_{ws}(t_s)}{p_{ws}(t_c)} \frac{p_c}{p_s} \times 100. \quad (33)$$

A análise desta expressão permite constatar que a determinação da humidade relativa depende, apenas, do conhecimento prévio das pressões e temperaturas observadas no saturador e na câmara de ensaio. Salienta-se, também, a existência de três termos distintos: o

rácio de pressão, p_c / p_s ; o grau efectivo de saturação, $p_{ws}(t_s) / p_{ws}(t_c)$; e o rácio do factor de ajustamento, $f_{ws}(p_s, t_s) / f_{ws}(p_c, t_c)$.

O *rácio de pressão* constitui uma estimativa aproximada da humidade relativa, considerando desprezáveis as diferenças de temperatura entre o saturador e a câmara de ensaio e o facto do ar não se comportar como um gás ideal. Por sua vez, o *grau efectivo de saturação* produz uma estimativa da diferença de temperatura existente entre o saturador e a câmara de ensaio, constituindo um rácio de correcção da diferença de temperatura.

O conhecimento das temperaturas t_s e t_c permite o cálculo das pressões de saturação (expressas em Pa), através de uma fórmula atribuída a Wexler [9] e aplicável à gama de temperaturas compreendida entre 0 °C e 100 °C,

$$p_{ws}(t) = \exp\left\{\left[\sum_{i=0}^6 C_i (t + 273,15)^{i-2}\right] + D \cdot \ln(t + 273,15)\right\}, \quad (34)$$

onde, $C_0 = -2,9912729 \times 10^3$;

$C_1 = -6,0170128 \times 10^3$;

$C_2 = 1,887643854 \times 10^1$;

$C_3 = -2,8354721 \times 10^{-2}$;

$C_4 = 1,7838301 \times 10^{-5}$;

$C_5 = -8,4150417 \times 10^{-10}$;

$C_6 = 4,4412543 \times 10^{-13}$;

$D = 2,858487$;

t = temperatura do ar expressa em °C.

Por último, refira-se que o *rácio do factor de ajustamento* tem como função ajustar o afastamento resultante do ar não possuir um comportamento de gás “ideal”. Verificando-se que cada *factor de ajustamento* é definido a partir de duas variáveis independentes, a pressão e a temperatura, e sabendo que a diferença de temperatura entre o saturador e a câmara de ensaio é relativamente pequena e que a diferença das pressões nestes mesmos elementos é relativamente grande, considera-se que a pressão assume um papel de maior influência neste factor. A fórmula de cálculo do *factor de ajustamento* é atribuída a Greenspan [9],

$$f_{ws}(p, t) = \exp \left[\alpha \left(1 - \frac{p_{ws}(t)}{p} \right) + \beta \left(\frac{p}{p_{ws}(t)} - 1 \right) \right], \quad (35)$$

onde p corresponde à pressão absoluta (em Pa), e $p_{ws}(t)$ representa a pressão de saturação do vapor (em Pa) a uma temperatura t . Os parâmetros α e β são definidos por Greenspan, recorrendo às seguintes expressões:

$$\alpha = \sum_{i=0}^3 A_i T^i, \quad (36)$$

$$\beta = \exp \sum_{i=0}^3 B_i T^i, \quad (37)$$

onde, $A_0 = 3,53624 \times 10^{-4}$;

$$A_1 = 2,93228 \times 10^{-5};$$

$$A_2 = 2,61474 \times 10^{-7};$$

$$A_3 = 8,57538 \times 10^{-9};$$

$$B_0 = -1,07588 \times 10^1;$$

$$B_1 = 6,32529 \times 10^{-2};$$

$$B_2 = -2,53591 \times 10^{-4};$$

$$B_3 = 6,33784 \times 10^{-7};$$

t = temperatura do ar em °C.

Estas expressões são válidas para valores de pressão até cerca de 2068 kPa e para uma gama de temperatura compreendida entre 0 °C a 100 °C.

3.3 Recomendações do fabricante relativamente à calibração

No que se refere à calibração das cadeias de medição de pressão e temperatura, recomenda-se que esta seja efectuada, preferencialmente, por comparação directa com os padrões mantendo a cadeia de medição de cada sensor completa, i.e., mantendo a sua ligação ao **scc**. Como alternativa, procede-se à remoção das cadeias de medição para calibração em meios externos. Esta recomendação resulta de se incorporar, no primeiro caso, as fontes de incerteza que são intrínsecas do funcionamento do equipamento no processo de calibração.

Este tipo de geradores de humidade dispõe de um sistema programável para correcção sistemática de desvios observados na calibração das cadeias de medição de pressão e de temperatura. O procedimento de configuração das curvas de correcção (após calibração) consiste em determinar previamente os coeficientes de uma curva de correcção (que poderá ser linear ou de segunda ordem), introduzindo-se essa parametrização no gerador, por programação directa, de acordo com a expressão [9]:

$$y = lin \cdot x^2 + span \cdot x + zero , \quad (38)$$

onde os coeficientes *zero*, *lin* e *span* coincidem com os parâmetros de uma curva quadrática de correcção, *x* representa a contagem produzida pelo conversor A/D durante a medição relativa a uma cadeia de medição e *y* corresponde ao valor de referência associado à grandeza mensurável, o qual resulta da indicação do padrão de referência utilizado na calibração.

Este procedimento pode ser realizado autonomamente ou seguindo um procedimento de calibração interna incorporado no próprio gerador, mediante a utilização de três patamares de referência pré-definidos para cada uma das cadeias de medição, de forma a cobrir a totalidade do seu intervalo de funcionamento.

3.4 Programação do controlador

O controlo do funcionamento do gerador de humidade visando a automatização do processo de ensaio está associado à utilização do programa informático *ControLog* fornecido pela *Thunder Scientific*.

A ligação entre o gerador e o computador onde se encontra instalado o referido programa é assegurada mediante uma ligação por porta de comunicação RS-232.

A definição e consulta dos parâmetros de comunicação da porta série do computador é efectuada no programa seleccionando as instruções do menu: ! > **communications settings**. Para assegurar uma comunicação eficaz é necessário garantir que existe uma definição de parâmetros igual entre ambos.

A geração de atmosferas de referência com humidade relativa e temperatura específicas pode ser efectuada através de duas vias de programação distintas identificadas como: modo *Generate*; e modo *Auto*.

O modo de operação *Generate* permite a criação de um fluxo de ar na câmara de ensaio correspondente a um único patamar de humidade relativa e temperatura, durante um período de tempo indeterminado usando as instruções do menu: **Run > Generate**. Os parâmetros operacionais são definidos na janela *Control Parameters* que possibilita a introdução dos respectivos valores pretendidos para humidade relativa, temperatura de saturação e caudal através da selecção das células da coluna: **Set Pt** (*Set Point*). A interrupção do estado de funcionamento do gerador pode ser efectuada em qualquer instante usando as instruções do menu: **Run > Shutdown**.

Por sua vez, o modo *Auto* permite a geração de vários perfis (conjuntos de patamares de ensaio) de humidade relativa e temperatura na câmara de ensaio, durante intervalos de tempo pré-definidos pelo utilizador. Torna-se portanto necessário criar um perfil ou utilizar um previamente gerado e arquivado na memória. Apresenta-se, de seguida, o conjunto de etapas para definir a estruturação de um novo perfil de ensaio:

- a. visualização da janela *Profile* (instruções do menu: **Window > Profile**);

Nesta janela podemos observar uma tabela cujas linhas definem cada um dos patamares humidade relativa e de temperatura que constituem o perfil a gerar, estando cada patamar associado a 6 colunas onde é possível configurar os seguintes parâmetros: *humidade relativa*; *temperatura de saturação*; *caudal*; *duração da execução da rampa* (duração de tempo de transição entre patamares); *tempo útil de geração* de um patamar; e por último, um *indicador*, que permite assegurar o cumprimento de determinadas tolerâncias de estabilização aplicáveis para o início da contagem do *tempo útil de geração* do patamar.

Assim, distinguem-se 3 fases associadas à geração de cada patamar: fase de rampa; fase de estabilização; e fase de geração útil do patamar.

- b. eliminação da informação do perfil anterior (instruções do menu: **Profile > New Profile...**);
- c. selecção do modo de controlo (instruções do menu: **Profile > Mode**);
- d. selecção das unidades (instruções do menu: **Profile > Units**);
- e. introdução da informação do perfil na janela de *Profile* referida no ponto a;
- f. configuração das condições de estabilidade (instruções do menu: **Profile > Assurance Conditions...**).

Nesta etapa, surge uma janela de interface onde é possível definir valores numéricos de tolerância e desvio padrão associados à *humidade relativa*, *temperatura de saturação* e *caudal*, isto é, permite estabelecer as condições de estabilidade destas grandezas que possibilitam o início da contagem do *tempo útil de geração* do patamar.

É possível guardar o perfil criado (instruções do menu: **Profile > Save Profile**) e, posteriormente, proceder à sua reabertura (instruções do menu: **Profile > Open Profile**) e execução (instruções do menu: **Run > Auto Profile**). Existe, ainda, a possibilidade de realizar uma sobreposição manual do perfil ao modo automático, a decorrer no gerador, podendo fixar-se o funcionamento deste numa dada posição do patamar de ensaio (instruções de menu: **Run > Hold point**), passar à fase seguinte (instruções de menu: **Run > Next Phase**) ou à posição seguinte (instruções de menu: **Run > Next Point**). A interrupção imediata do funcionamento do gerador é realizada conforme indicado anteriormente (instruções de menu: **Run > Shutdown**).

Como configuração de base, o controlador efectua a leitura e processamento dos dados experimentais em intervalos de 1 min, sendo possível alterar este parâmetro (instruções de menu: **File > Data Storage Interval**).

O registo dos valores medidos e dos valores processados encontra-se permanentemente acessível, podendo ser consultado usando a janela de interface *Tabular Data* (instruções de menu: **Window > Tabular Data**), e o seu conteúdo pode ser visualizado graficamente pela activação da janela *Graph* (instruções de menu: **Graph > Enable Strip Chart**). Toda esta informação pode ser arquivada (instruções de menu: **File > Save Data As**) num ficheiro com extensão “.dat”, podendo ser posteriormente reaberto novamente pelo programa de controlo (instruções de menu: **File > Import Data**), bem como, exportado para outros programas de tratamento de dados experimentais.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente relatório foi elaborado como elemento de apoio para a actividade desenvolvida pelo Núcleo de Qualidade Metrológica (NQM) e, em particular, naquela que se insere no âmbito do Laboratório Central de Apoio Metrológico (LCAM). Essa actividade encontra-se vocacionada para o estudo da grandeza mensurável humidade (no primeiro caso) e para a sua aplicação prática em calibração e ensaio metrológico de instrumentação (no segundo caso) que dispõe de capacidade para efectuar a sua medição.

Relativamente ao primeiro contexto focado acima, o estudo dos conceitos fundamentais associados à medição da grandeza humidade, a sua relevância para a compreensão dos processos utilizados na sua medição, cuja diversidade é significativa, justifica a atenção que lhe é dedicada. No âmbito da actividade desenvolvida pelo NQM, este conhecimento servirá de base a estudos relacionados com a avaliação de incertezas de medição e com a obtenção de melhores capacidades metrológicas neste domínio.

Quanto à utilidade da informação contida neste relatório para a actividade desenvolvida pelo LCAM (segundo contexto focado), destaca-se a aplicação deste conhecimento na utilização prática dos padrões de referência, de transferência e de trabalho do próprio laboratório mas, também, no estabelecimento de cadeias de rastreabilidade apropriadas, enquadradas na calibração e no ensaio metrológico de equipamentos de medição de humidade, dando resposta às necessidades de calibração das tecnologias existentes nos diversos laboratórios do LNEC.

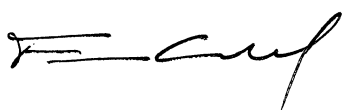
A segunda parte deste relatório encontra-se direccionada para a agregação da informação fundamental relativa ao padrão de referência do LCAM, o gerador de humidade TSC 2500, o qual, por se encontrar no topo da cadeia de rastreabilidade da grandeza em causa no contexto do laboratório, requer um conhecimento detalhado e aprofundado dos aspectos que determinam o seu desempenho e a sua exactidão.

Neste sentido, efectuou-se uma descrição dos seus elementos fundamentais, dos princípios e dos modelos matemáticos aplicados, da sua caracterização metrológica e de uma breve descrição de outros aspectos descritivos considerados relevantes relacionados, designadamente, com a calibração e a programação do controlador.

LNEC, Lisboa, Fevereiro de 2007

VISTOS

O Director do CIC

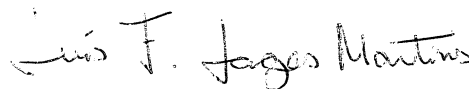


Francisco Carvalhal
Investigador Coordenador

AUTORIA



Álvaro Silva Ribeiro
Lic.º Física Tecnológica, Doutor
Investigador Auxiliar



Luís F. Lages Martins
Eng.º Mecânico
Bolsheiro de Iniciação à Investigação Científica

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM)* – Genève (Suíça), International Organization for Standardization (ISO), 1994. ISBN 92-67-01075-1.
- [2] *Le Système international d'unités (SI)*. 8^e Éd. – Paris (França), Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), 2006. ISBN 92-822-2213-6.
- [3] Psychrometrics – In *1993 ASHRAE Handbook Fundamentals*. SI Ed. Atlanta (E.U.A.), American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) Handbooks, 1993.
- [4] Hardy, B. – ITS-90 formulations for vapor pressure, frostpoint temperature, dewpoint temperature and enhancement factors in the range – 100 °C to + 100 °C. In *Proceedings of the Third International Symposium on Humidity & Moisture*. London (Reino Unido), 1998.
- [5] Pina, H. – Equações não-lineares. In *Métodos Numéricos*. Lisboa (Portugal), McGraw Hill. 1995. ISBN 972-9298-04-8. pp. 179-181.
- [6] Visscher, G. J. – Humidity and Moisture Measurement. In Webster, J. G., *Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*. CRC Press in Cooperation with IEEE Press, 1998. ISBN 0-8493-2145-X.
- [7] Doebelin, E. – *Measurement Systems – Application and Design*. 4th Ed. Singapore, McGraw-Hill International Editions, 1990. ISBN 0-07-017338-9.
- [8] Bennewitz, J. – Solving Humidity Calibration Challenges in Today's Metrology Lab. *Sensors Magazine*. Advanstar Communications Inc., Vol. 21, 2004.
- [9] *Series 2500 Benchtop Two-Pressure Humidity Generator – Operation and Maintenance Manual*. 4th Ed. Albuquerque (E.U.A.), Thunder Scientific Corporation, 2003.

ANEXO 1 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO GERADOR TSC 2500

Tabela 1: Especificações técnicas [9].

Humidade relativa	
Gama de medição	10 % a 95 %
Resolução	0,02 %
Exactidão	$\pm 0,5 \% @ p_c t_c$
Temperatura da câmara de ensaio	
Gama de medição	0 °C a 70 °C
Resolução	$\pm 0,02$ °C
Uniformidade *	$\pm 0,1$ °C
Exactidão	$\pm 0,06$ °C
Pressão da câmara de ensaio	
Gama de medição	Pressão ambiente
Exactidão	$\pm 0,15$ % FS
Caudal de gás	
Gama	2 L/min a 20 L/min
Resolução	0,02 L/min
Exactidão	± 2 % FS
Tipo de gás	Ar ou azoto
Pressão máxima operacional permitida	1207 kPa
Aquecimento	Resistência de imersão
Taxa de aquecimento/arrefecimento média	2,5 min/°C
Fluido de arrefecimento	R-134A
Dimensões da janela da câmara de ensaio	152 mm x 152 mm
Diâmetro da porta de acesso lateral	48 mm
Dimensões físicas	Largura: 838 mm
	Altura: 514 mm
	Profundidade: 508 mm
Dimensões físicas com equipamento de transporte	Largura: 1020 mm
	Altura: 1360 mm
	Profundidade: 584 mm
Dimensões da câmara de ensaio	Largura: 305 mm
	Altura: 305 mm
	Profundidade: 254 mm

* considerando o funcionamento a uma temperatura compreendida entre ± 10 °C da temperatura ambiente.

ANEXO 2 – DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS INTERNOS DO GERADOR TSC 2500

Na constituição interna do gerador de humidade em estudo, podemos englobar os seus diversos componentes em quatro sistemas distintos [9]:

- sistema de controlo computadorizado;
- sistema eléctrico;
- sistema pneumático;
- sistema de transferência de calor.

No sistema de controlo computadorizado podemos encontrar os seguintes componentes:

- STD bus, que por sua vez reúne os elementos:
 - placa CPU com micro-processador 64180 (STD-CPU);
 - placa conversora analógica digital de 15 bit e 8 canais (STD-A/D);
 - placa de memória (STD-MEM);
 - placa associada ao *liquid crystal display* (STD-LCD);
 - placa conversora de fornecimento de energia eléctrica (STD-PS).
- *liquid crystal display* (LCD), 256 x 128;
- teclado frontal (KB) de 16 teclas.

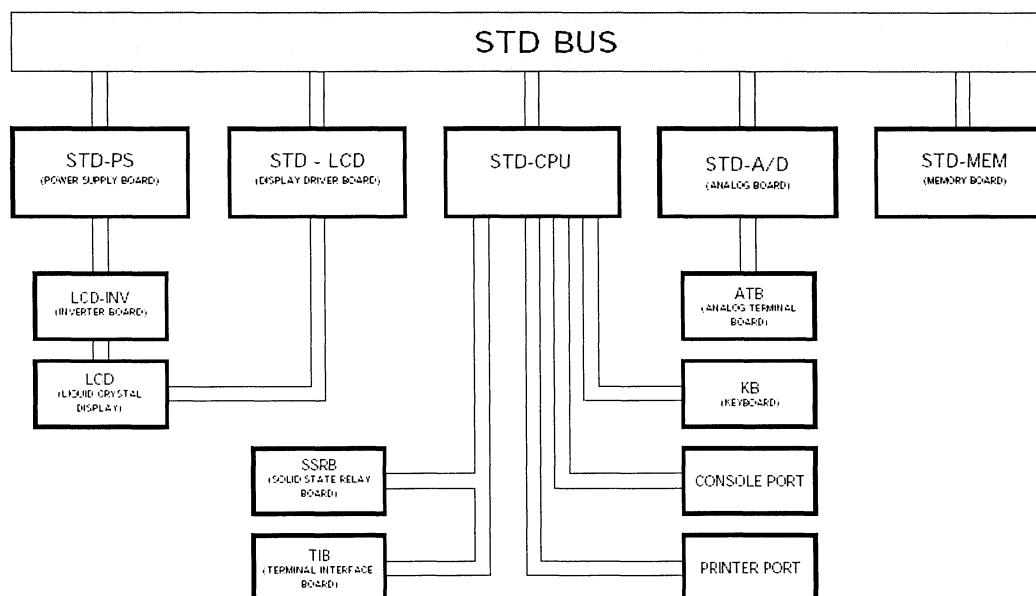


Figura 3: Sistema de controlo computadorizado.

O sistema eléctrico assegura a distribuição de corrente eléctrica adequada aos diversos componentes do gerador de humidade, nomeadamente:

- compressor do sistema de transferência de calor;
- resistências de aquecimento do pré-saturador;
- resistências de aquecimento do fluido circulante;
- bomba do fluido circulante;
- ventoinha da consola;
- transformador, que por sua vez fornece energia eléctrica a:
 - válvulas electromecânicas;
 - placa conversora de fornecimento de energia (STD-PS), à qual todo o sistema computadorizado retira energia eléctrica.

A constituição do sistema pneumático encontra-se descrita na figura seguinte:

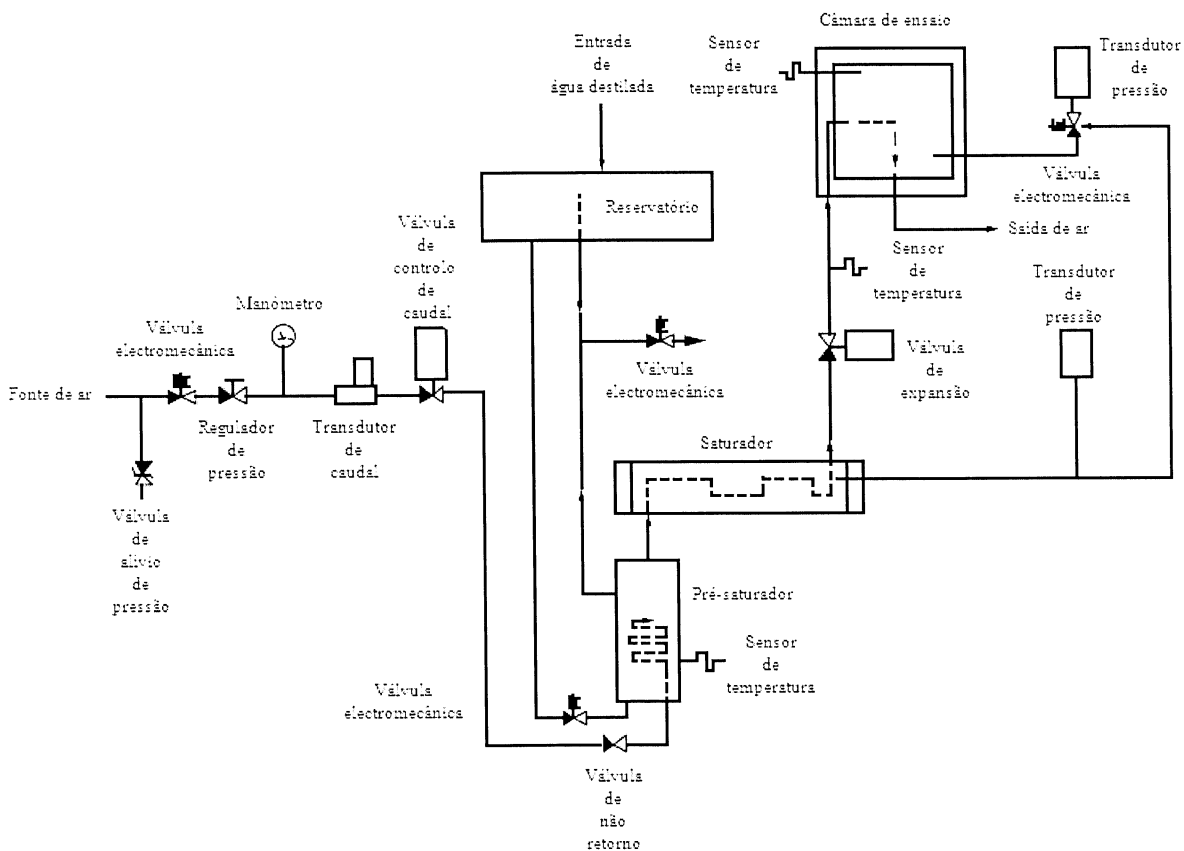


Figura 4: Sistema pneumático.

Este sistema é auxiliado por uma fonte externa de fornecimento de ar, a uma pressão máxima de 1207 kPa e com um caudal de 20 L/min. É imperativo a ausência de partículas com dimensão superior a 0,5 μm e um conteúdo de hidrocarbonetos inferior a 1 ppm.

Quer o reservatório quer o pré-saturador possuem transdutores de nível de líquido que permitem a monitorização do nível de água destilada, no caso do reservatório, e a manutenção de um nível constante, no caso do pré-saturador.

De referir, ainda, a existência de duas resistências de aquecimento neste sistema, cuja acção se exerce junto do pré-saturador, assegurando a manutenção da sua temperatura na gama compreendida entre + 20 °C e + 90 °C.

Destaca-se, também, a presença dos seguintes equipamentos:

- transdutores de pressão do tipo piezoresistivo, um dedicado à medição na gama compreendida entre 0 kPa e 345 kPa, e outro, na medição da pressão na gama compreendida entre 345 kPa e 1034 kPa (a selecção do transdutor é efectuada pela acção de uma válvula electromecânica);
- termómetros de resistência (10 k Ω), colocados no pré-saturador associados a uma válvula de expansão, visando efectuar a medição para o controlo da temperatura e na câmara de ensaio, exclusivamente para indicação. Adicionalmente, existe uma resistência de referência utilizada na compensação de deriva de curto e longo prazo;
- caudalímetro (mássico).

O sistema de transferência de calor tem por base um fluido circulante correspondente a uma mistura de 25-35 % de água e 65-75 % de propileno glicol, o qual, pela acção de uma bomba, percorre um circuito partilhado entre o saturador e a câmara de ensaio. Procura-se, assim, garantir uma temperatura constante a nível do saturador e da câmara de ensaio. Este valor de temperatura é adquirido por um termómetro de resistência (10 k Ω) dedicado à medição da temperatura de saturação e ao seu controlo.

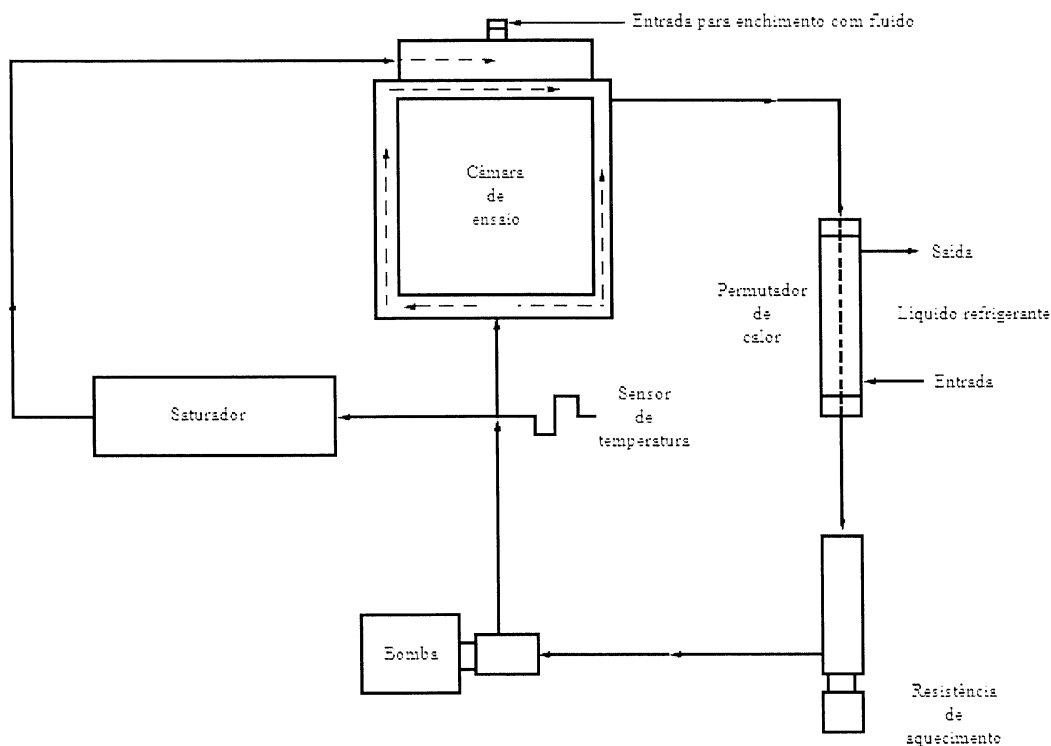


Figura 5: Sistema de transferência de calor.

O aumento da temperatura do fluido é garantido pela ação de uma resistência de aquecimento, enquanto que o seu arrefecimento resulta da sua passagem por um permutador de calor, associado a um sistema de refrigeração auxiliar.

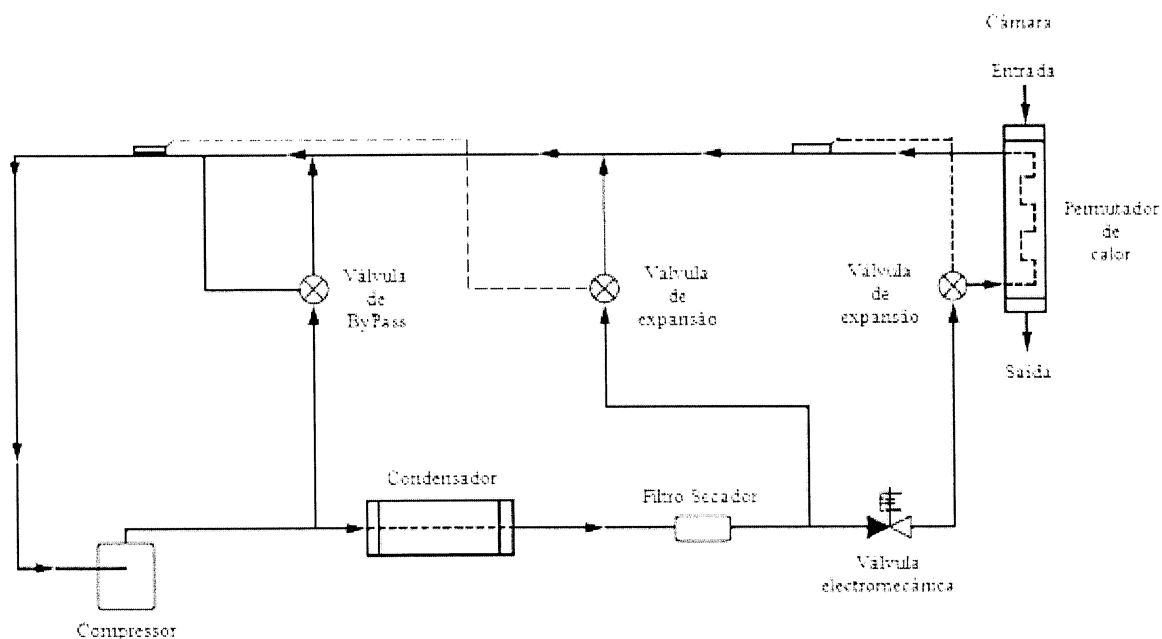


Figura 6: Sistema de refrigeração auxiliar do sistema de transferência de calor.

Este sistema auxiliar utiliza o fluido R-134A ($\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$) como fluido refrigerante, o qual é injectado no permutador de calor (presente no sistema de transferência de calor), pela actuação de uma válvula electromecânica, de acordo com as indicações dadas pelo sistema computadorizado de controlo.

Trata-se de um sistema de refrigeração comum, onde a acção do compressor permite um aumento de pressão do fluido na sua forma de vapor, o qual passa em seguida por um condensador, onde se assiste à sua passagem para o estado líquido, pela diminuição da sua temperatura. Segue-se a passagem pela válvula de expansão, que provoca a diminuição da sua pressão, dando-se a sua entrada no permutador de calor, que neste sistema funciona como evaporador, permitindo ao fluido refrigerante receber calor proveniente do sistema de transferência de calor, originando conseqüentemente, a diminuição de temperatura desejada neste sistema.

O sistema de refrigeração apresenta ainda um outro conjunto de válvulas referentes à sua operacionalidade em modo *stand-by* ou modo *bypass*, sempre que não seja necessária a sua intervenção no sistema de transferência de calor, garantindo-se assim um funcionamento contínuo.

