

**Alfredo Pinto Fontoura Filho**

**Automação de um condicionador de ar para testes  
de potência líquida em motores de veículos  
rodoviários - Norma NBR ISO 1585**

**PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
MECÂNICA**

**Programa de Graduação em  
Engenharia Mecânica**

**Rio de Janeiro  
Julho de 2015**

**Alfredo Pinto Fontoura Filho**

**Automação de um condicionador de ar para testes de potência  
líquida em motores de veículos rodoviários - Norma NBR ISO  
1585**

## **PROJETO DE GRADUAÇÃO**

Projeto apresentado como requisito para obtenção de  
grau de Bacharel pelo Programa de  
Graduação em Engenharia Mecânica do  
Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

**Orientador**  
Professor Sérgio Leal Braga

**Rio de Janeiro  
Julho de 2015**

## **Resumo**

Os laboratórios veiculares e laboratórios das montadoras realizam testes em motores de combustão interna para sintetizarem resultados baseados em normas técnicas que especificam os métodos de ensaios aplicados à avaliação do desempenho do motor. Testes em um dinamômetro de bancada, há equipamentos auxiliares necessários para garantir as condições padrão regidas por estas normas, como por exemplo: o controle da temperatura e umidade relativa do ar. Fica evidente, a importância de um estudo dos sistemas de condicionamento presente na sala de testes e disponibilizando desta forma, o ar nas condições padrão na admissão do motor. Esta dissertação apresenta o projeto de automação de um sistema de condicionamento do ar, com especificações dos transdutores e controladores que controlam a temperatura e umidade do ar para testes de motores, independente das condições ambientais.

## **Palavras-chave**

Controle e automação; condicionamento de ar de admissão; testes de motores; ensaios veiculares laboratoriais.

**Abstract**

The vehicular laboratories and manufacturers laboratories conduct tests on internal combustion engines to synthesize results based on technical standards which specify test methods applied to the evaluation of engine performance. Tests on a dynamometer bench, there are auxiliary equipment needed to ensure standard conditions according by these standards, such as: control of temperature and relative humidity. It is evident the importance of a study of this conditioning systems in the room of engine testing and thus providing the air at standard conditions in the engine inlet. This work presents the automation project of an air conditioning system, with specifications of the transducers and controllers that control temperature and humidity for engine tests, regardless of environmental conditions.

**Keywords**

Control and automation; intake air conditioning; engine tests; engine laboratory tests.

## Sumário

1.	Introdução	9
1.1-	Ensaaios laboratoriais em motores	9
1.2-	Objetivo do projeto	11
2-	Conceitos fundamentais do ar	12
2.1-	Processos psicrométricos	14
2.2-	Parâmetros psicrométricos	14
2.2.1-	Umidade relativa	14
2.2.2.-	Umidade absoluta	15
2.2.3-	Temperatura de ponto de orvalho	17
2.2.4-	Volume específico	17
2.2.5-	Entalpia específica	18
2.2.6-	Temperatura do bulbo seco e bulbo úmido	19
2.3-	Processos de condicionamento de ar	19
2.4-	Carta psicrométrica	20
3-	Norma NBR ISO 1585: condições padrão de ensaio	24
4-	Variáveis em testes de motores	25
4.1-	Condições de consumo de ar do motor	25
4.2-	Desempenho do motor	25
4.3-	Temperatura	26
4.4-	Umidade	26
5-	Dimensionamento e especificação do sistema de controle	28
5.1-	Serpentina de água gelada	31

5.2- Bomba d'água	35
5.3- Aquecedor elétrico	36
5.4- Umidificador	38
6- Controle e automação	42
6.1- Controle da temperatura	42
6.2- Controle da umidade	42
6.3- Dispositivos de atuação	43
6.4- Dispositivos de detecção	43
6.5- Controlador	44
6.5.1- Classificação dos controladores	45
6.5.2- Tipos de controle	45
6.6- Controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID)	46
7- Desenvolvimento dos ensaios e resultados	48
8- Conclusões	52
8.1- Sugestões de melhorias e trabalhos futuros	52
9- Referências bibliográficas	53

**Lista de figuras**

Figura 1 – Carta psicrométrica em pressão barométrica	20
Figura 2 – Linhas de temperatura de bulbo seco	21
Figura 3 – Linhas de temperatura de bulbo úmido	21
Figura 4 – Linhas de temperatura do ponto de orvalho	21
Figura 5 – Linhas de entalpia de ar seco	22
Figura 6 – Linhas de umidade absoluta	22
Figura 7 – Linhas de umidade relativa	22
Figura 8 – Linhas de volume específico	23
Figura 9 – Exemplo prático de um processo psicrométrico	23
Figura 10 - Condicionador montado, desenhado em SolidWorks	28
Figura 11 - Condicionador esquematizado, transdutores e controladores	30
Figura 12 - Serpentina de água gelada	31
Figura 13 – Bomba Schneider com motor WEG	35
Figura 14 – Aquecedor elétrico	36
Figura 15 – Umidificador	39
Figura 16 – Modo de trabalho de um controlador	45
Figura 17 – Gráfico do teste 01: $T = 40^{\circ}\text{C}$ e $U_r = 80\%$	48
Figura 18 – Gráfico do teste 02: $T = 40^{\circ}\text{C}$ e $U_r = 65\%$	49
Figura 19 – Gráfico do teste 03: $T = 30^{\circ}\text{C}$ e $U_r = 75\%$	50
Figura 20 – Gráfico do teste 04: $T = 25^{\circ}\text{C}$ e $U_r = 30\%$	50

### Lista de símbolos

$A_{Sag}$  – Área transversal da serpentina de água gelada [ $m^2$ ]

$c_{p,ar}$  – Calor específico do ar [ $kJ/kg.K$ ]

$c_{p,ag}$  - Calor específico a pressão constante [ $kJ/kg.K$ ]

$e$  – Erro [-]

$G_I$  – Ganho integral

$G_D$  – Ganho derivativo

$G_P$  – Ganho proporcional [-]

$H$  – Entalpia da mistura dos gases [ $kJ$ ]

$H_a$  – Entalpia do ar seco [ $kJ$ ]

$H_v$  – Entalpia do vapor d'água [ $kJ$ ]

$M_a$  – Massa molar do ar seco [ $kg/kmol$ ]

$M_v$  – Massa molar de vapor [ $kg/kmol$ ]

$m_a$  – Massa de ar seco [ $kg$ ]

$m_v$  – Massa de vapor d'água [ $kg$ ]

$m_{vap}$  – Taxa de umidificação [ $kg/h$ ]

$m_{vsat}$  – Massa de vapor saturado [ $kg$ ]

$n$  – Número de mols [-]

$n_a$  – Número de mols do ar seco [-]

$n_v$  – Número de mols de vapor d'água [-]

PID – Proporcional integral derivativo [-]

$p$  – Pressão total [ $kPa$ ]

$p_a$  – Pressão do ar seco [ $kPa$ ]

$p_v$  – Pressão de vapor d'água [ $kPa$ ]



$p_{vsat}$  – Pressão de vapor saturado [kPa]

$Q_{Sag}$  – Capacidade de troca de calor da serpentina gelada [kW]

$Q_{re}$  – Capacidade térmica das resistências elétricas [kW]

$R_v$  – Contante de gás (vapor) [J/mol.K]

$R_a$  – Contante de gás (ar seco) [J/mol.K]

$R$  – Constante de gases [J/mol.K]

$T$  – Temperatura [K]

$T_{ag,e}$  e  $T_{ag,s}$  - Temperaturas de entrada e saída da serpentina [K]

$T_{ar,s}$  e  $T_{ar,e}$  - Temperaturas de saída e entrada do ar nas resistências elétricas [K]

$U_r$  – Umidade relativa [%]

$V$  – Volume [m<sup>3</sup>]

$v_a$  – Volume específico do ar seco [m<sup>3</sup>]

$V_{ag}$  - Vazão volumétrica de água gelada fornecida pela bomba d'água [m<sup>3</sup>/s]

$V_{ar}$  – Vazão volumétrica do ar [m<sup>3</sup>/s]

$var_{prop}$  – Variável proporcional [-]

### **Letras gregas**

$\Phi$  – Umidade relativa [%]

$\omega$  – Umidade absoluta [g de água/kg de ar]

$\rho_{ag}$  - Densidade da água [kg/m<sup>3</sup>]

$v_{ag}$  – Velocidade da água gelada [m/s]

$\rho_{ar}$  – Massa específica do ar [kg/m<sup>3</sup>]

$\omega_{ar,s}$  e  $\omega_{ar,e}$  - Umidade absoluta do ar na saída e entrada pelo umidificador [kg<sub>vap</sub>/kg<sub>ar</sub>]

## **1- Introdução**

### **1.1- Ensaios laboratoriais em motores:**

Os testes e pesquisas de motores podem ser testados em laboratórios de duas formas: montados no próprio veículo ou instalado em uma bancada. A primeira forma necessita de uma sala de testes maior, pois os pneus do carro são colocados em um rolo, chamado dinamômetro de chassi, podendo simular as condições que o veículo enfrenta no uso real. Esses dinamômetros possuem um alto custo e para obter uma boa repetibilidade nos testes, vai depender do modo da condução do veículo. Por isso, há um outro custo, a utilização de robôs para realizar com maior precisão os ensaios, no entanto, são indicados para testes de acelerações e desacelerações para análise de emissões de poluentes e sua eficiência pelo consumo de combustível. A segunda forma, de custo mais baixo, o motor é instalado em um dinamômetro de bancada. Garante assim, uma boa repetibilidade na obtenção dos dados mais precisos, sem ter a necessidade de descontar em cálculos, as perdas feitas pelas engrenagens da transmissão do torque da caixa de marcha até as rodas, impondo as condições de carga e rotação diretamente no eixo virabrequim do motor [4].

Dentro desse contexto, há um desenvolvimento de diferentes sistemas auxiliares de condicionamento do ar que são os responsáveis pelo controle das condições padrão da norma, dando maior importância no controle de temperatura e umidade relativa.

Este estudo está orientado no funcionamento do sistema de um condicionador do ar de admissão e as suas variáveis podem ter os seguintes efeitos significativos no desempenho do motor:

- A variação da temperatura do ar de admissão em 1°C, a potência líquida do motor varia em aproximadamente 0,5% com;
- O aumento da pressão de admissão em 1hPa, o torque do motor aumenta em aproximadamente 0,12%;
- O fator que influencia nas emissões de poluentes e principalmente na quantidade de NO<sub>x</sub> é o teor de umidade relativa do ar.

Outras variáveis que podem modificar os resultados da medição de potência do motor, são: pressão e temperatura na linha de combustível, controle da contrapressão no escape de exaustão, mudanças de configurações das peças mecânicas internas. O foco será: sem modificações no motor e controlar a temperatura e umidade do ar de admissão. Com as informações relacionadas acima, o condicionamento do ar de combustão tem uma grande importância na realização de testes, quando o ensaio é realizado nas condições padrão de referência, baseadas em normas técnicas.

O uso de filtro proporciona ao motor a qualidade do ar que deve ser fornecido com um mínimo grau de particulados, além das condições controladas temperatura e umidade relativa.

Nos ensaios que são de relevância para fábricas de motores, os dados que são coletados e documentados, devem ser corrigidos para as condições das normas técnicas. Em testes em série de produção para funcionamento, as variações da condição do ar admitido não são particularmente importantes.

## **1.2- Objetivo do projeto:**

O objetivo principal, será o desenvolvimento da automação de um modelo de condicionamento de ar de admissão de motores, a fim de permitir os ensaios sob condições padrão de referência através do controle da temperatura e umidade do ar, baseado na norma NBR ISO 1585 [1].

- Projetar e dimensionar os equipamentos auxiliares para que o sistema de condicionamento de ar de admissão funcione;
- Pesquisas dos transdutores de temperatura e umidade relativa e instalar no melhor posicionamento para aquisição de dados;
- Pesquisas sobre controladores PID;
- Com a automação pronta, estabelecer os parâmetros e condições de trabalho do sistema completo de acordo com a norma NBR ISO 1585 [1];
- Com a aquisição de dados, os processadores PID operam por malha fechada de informações para controlarem os equipamentos auxiliares.

Para realizar um bom controle e automação, é importante ter o conhecimento de como um condicionador funciona e as propriedades envolvidas. Neste caso, os estudos nos processos de condicionamento do ar serão de alta importância.

## 2- Conceitos fundamentais do ar

O ar atmosférico é resultado de uma mistura complexa de gases e contaminantes. O ar seco é definido como ar atmosférico com a ausência de vapor d'água. A pressão atmosférica é relativamente baixa, portanto o ar seco pode ser tratado como gás ideal, mesmo que haja vapor d'água, no estado saturado ou acima, pode levar em conta o ar atmosférico como uma mistura de dois gases ideais. Quando há a mistura de ar seco com o vapor d'água, chama-se de ar úmido [9].

Composição aproximada do ar seco: 78,08% de Nitrogênio ( $N_2$ ), 20,95% de Oxigênio ( $O_2$ ), 0,93% Argônio (Ar), 0,03% de Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ), 0,01% de outros [6].

O vapor d'água no ar é produto da evaporação de água das superfícies das massas de água, a umidade atmosférica é maior em regiões banhadas pelos mares e menor em regiões áridas.

O modelo utilizado para estudo de mistura de gases é o de Dalton, no qual trata cada componente como se ele ocupasse sozinho o mesmo volume, a mesma temperatura da mistura. A lei da mistura de gases perfeitos ou lei das pressões parciais para qualquer mistura de gases e vapores, estabelece: cada gás ou vapor na mistura exerce uma pressão parcial individual que é a pressão que o gás exerce se ocupasse o espaço sozinho e a pressão total da mistura seja a soma das pressões dos componentes, denominadas soma das pressões parciais [7]

Neste caso particular, é mais conveniente utilizar a base molar porque a constante de gás perfeito é única. A aplicação do modelo de gás perfeito a mistura de gases fornece.

$$pV = nRT \quad (1)$$

Onde:

$$n = n_a + n_v \quad (2)$$

Para cada componente:

$$p_a V = n_a RT \quad (3)$$

$$p_v V = n_v RT \quad (4)$$

O ar atmosférico, sendo uma mistura mecânica de gases, obedece à lei de Dalton. A pressão barométrica total é sempre a soma das pressões parciais dos gases secos e vapor d'água. Então, a pressão total do ar ( $p$ ), é a soma da pressão parcial do ar seco ( $p_a$ ) e do vapor ( $p_v$ ).

$$\frac{pV}{RT} = \frac{p_a V}{RT} + \frac{p_v V}{RT} \quad (5)$$

Ou,

$$p = p_a + p_v \quad (6)$$

## 2.1- Processos psicrométricos

O estudo das propriedades e transformações sofridas pelo ar úmido nos processos de condicionamento é conhecido como psicrometria.

## 2.2- Parâmetros psicrométricos

### 2.2.1- Umidade relativa

A umidade relativa é definida como a razão entre a massa de vapor d'água  $m_v$  e a quantidade máxima de vapor d'água pode conter na mesma temperatura.

$$\Phi = \frac{m_v}{m_{vsat}} \quad (7)$$

Como o vapor d'água é considerado um gás perfeito, a definição se reduz a razão entre a pressão parcial do vapor na mistura  $p_v$ , e a pressão de saturação  $p_{vsat}$ .

$$\Phi = \frac{p_v V / RT}{p_{vsat} V / RT} = \frac{p_v}{p_{vsat}} \quad (8)$$

A pressão de saturação ocorre quando se tem a máxima quantidade possível de vapor d'água dissolvido no ar a uma mesma temperatura.

A umidade relativa varia entre 0 e 1, pois é comum fornecer valores de  $\Phi$  em porcentagem. Como indicadores,  $\Phi=0\%$  significa ar seco e  $\Phi=100\%$  como ar úmido saturado [7].

Com essa relação, quando a temperatura é reduzida até a saturação, o percentual aumenta até a temperatura de orvalho. Como consequência será a condensação do vapor d'água, resultando na secagem do ar por refrigeração.

### 2.2.2- Umidade absoluta

A umidade absoluta  $\omega$ , de uma mistura de ar e vapor d'água é definida como sendo a razão entre a massa de vapor d'água  $m_v$  e a massa de ar seco  $m_a$ . Os termos “razão de umidade” ou “umidade específica” são utilizados como sinônimo de umidade absoluta.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (9)$$



Considerando a mistura de ar seco e vapor d'água como gases perfeitos, pode desenvolver uma expressão para umidade absoluta em função das pressões parciais de acordo com o modelo de Dalton.

$$m_v = \frac{p_v V}{R_v T} \quad (10)$$

$$m_a = \frac{p_a V}{R_a T} \quad (11)$$

$$\omega = \frac{p_v V / R_v T}{p_a V / R_a T} = \frac{p_v / R_v}{p_a / R_a} = \frac{p_v / 0,4615}{p_a / 0,287} = 0,622 \frac{p_v}{p_a} \quad (12)$$

Como:

$$\frac{R_a}{R_v} = \frac{M_a}{M_v} \quad (13)$$

É a relação entre as massas moleculares do vapor e do ar seco, onde  $M_v = 18,01 \text{ kg/kmol}$  e  $M_a = 28,96 \text{ kg/kmol}$ . Assim, pode também calcular a umidade absoluta através da equação:

$$\omega = \frac{p_v V / R_v T}{p_a V / R_a T} = \frac{M_v p_v}{M_a p_a} = \frac{18,01 \cdot p_v}{28,96 \cdot p_a} = 0,62 \frac{p_v}{p_a} \quad (14)$$

Uma expressão que relaciona umidade relativa  $\Phi$  e umidade absoluta  $\omega$ , pode ser estabelecida como.

$$\omega = 0,62 \Phi \frac{p_{vsat}}{p_a} \quad (15)$$

$$\Phi = 1,61 \omega \frac{p_a}{p_{vsat}} \quad (16)$$

### 2.2.3.- Temperatura do ponto de orvalho

Quando a temperatura a qual o vapor d'água é igual a temperatura de saturação correspondente à pressão parcial do vapor d'água, o ar é chamado de saturado e a temperatura como temperatura do ar em ponto de orvalho.

### 2.2.4- Volume específico

O volume específico é obtido pela relação da massa de ar seco entre razão do volume ocupado pela mistura pela massa de ar seco presente.

$$v_a = \frac{v}{m_a} \quad (17)$$

### 2.2.5- Entalpia específica

Quando se aplica o balanço de energia em um sistema de condicionamento de ar, a entalpia admite que a entalpia total seja a soma da entalpia do ar e do vapor d'água. Assim, validado com a hipótese dos gases perfeitos:

$$H = H_a + H_v \quad (18)$$

$$H = m_a h_a + m_v h_v \quad (19)$$

Considerando a definição de umidade absoluta, tem-se a seguinte equação para entalpia específica da mistura:

$$h = h_a + \omega h_v \quad (20)$$

Essa expressão será utilizada para indicar o nível de energia de uma substância. Se uma transformação ocorre apenas através da transferência de energia térmica, pela primeira lei da termodinâmica pode-se obter a variação de entalpia como sendo igual à variação do calor removido ou adicionado [7].

#### **2.2.6- Temperatura do bulbo seco e bulbo úmido**

A temperatura do ar medida por um termômetro convencional é denominada como temperatura do bulbo seco. Um termômetro com o bulbo é coberto por uma mecha de algodão saturado de água é a temperatura do bulbo úmido.

Alocando os dois tipos de termômetros em um duto com ar escoando, a temperatura do bulbo úmido vai diminuir mais rápido, devido à umidade que promove a transferência de calor por evaporação até atingir um ponto estacionário. Quanto mais seco o ar, maior o resfriamento. Portanto, quanto maior a diferença entre as temperaturas de bulbo úmido e de bulbo seco, menor a umidade relativa; quanto menor a diferença, maior a umidade relativa. Se o ar está saturado, nenhuma evaporação ocorrerá e os dois termômetros terão leituras idênticas [5].

#### **2.3- Processos de condicionamento de ar**

Duas propriedades do ar de ventilação que particularmente entram na admissão do motor são: temperatura e umidade.

O objetivo comum desde condicionador de ar será a aquisição de dados e utilizados para identificar, modificar, homologar ou desenvolver critérios para avaliação do desempenho do motor.

No entanto, os dados do desempenho do motor de combustão em um dinamômetro de bancada, dependem fortemente das condições atmosféricas do ar admitido pelo motor.

## 2.4- Carta psicrométrica

As propriedades de misturas ar e vapor d'água são dados de forma gráfica, encontradas de diferentes formas e uma maneira versátil de relacioná-las, chamada de carta psicrométrica [7].

O uso desta carta permite as soluções de muitos problemas práticos onde o outro modo requer soluções complexas. É bom lembrar que são necessárias três propriedades independentes, tais como: temperatura, pressão e composição da mistura.

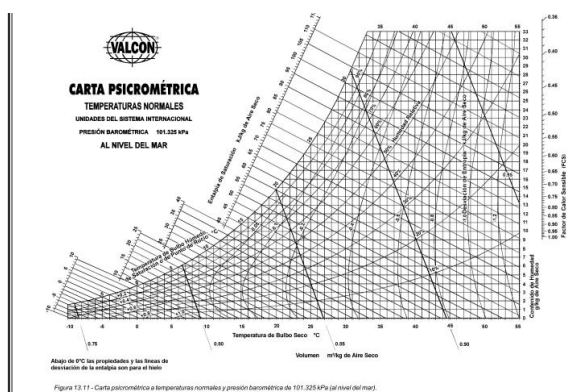


Figura 1 – Carta psicrométrica em pressão barométrica

Usualmente, a carta é construída com a pressão de 100 kPa. Abaixo a demonstração de cada linha da carta psicrométrica:

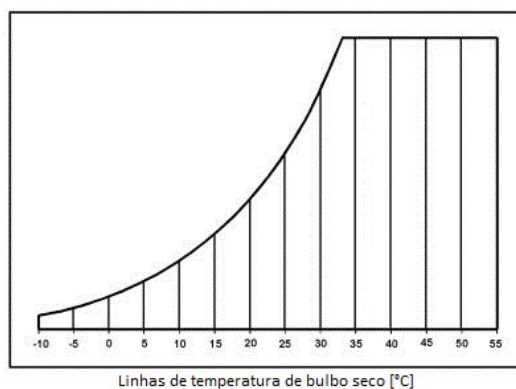


Figura 2 – Linhas de temperatura de bulbo seco

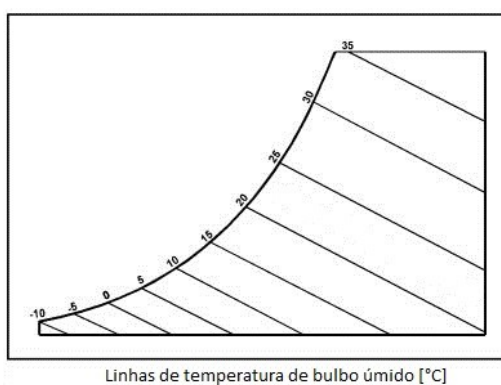


Figura 3 – Linhas de temperatura de bulbo úmido

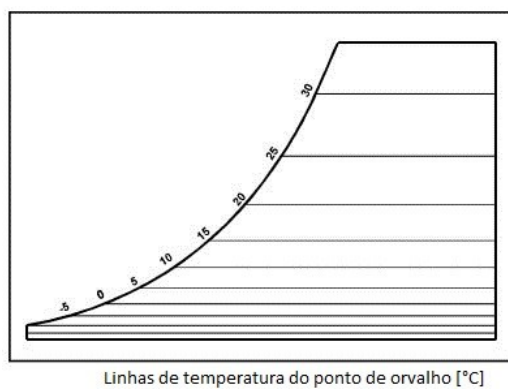


Figura 4 – Linhas de temperatura do ponto de orvalho

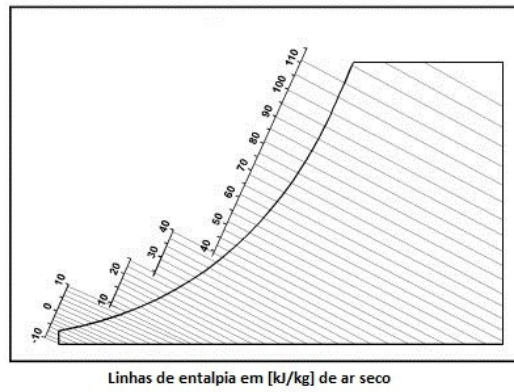


Figura 5 – Linhas de entalpia de ar seco

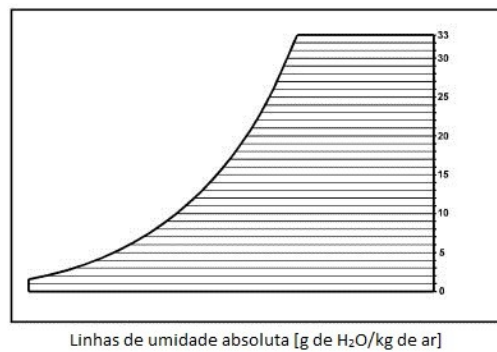


Figura 6 – Linhas de umidade absoluta

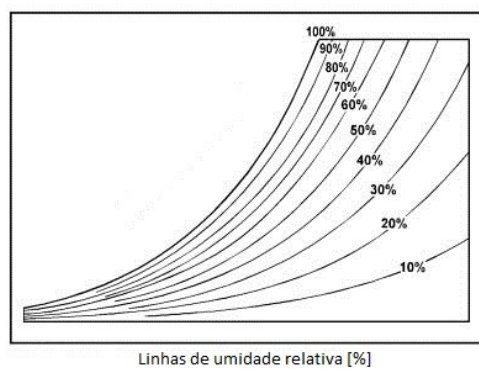


Figura 7 – Linhas de umidade relativa

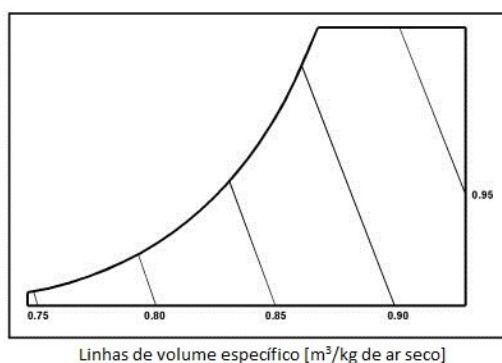


Figura 8 – Linhas de volume específico

Um exemplo prático de um condicionamento do ar, pela carta psicrométrica. Supondo um valor de temperatura ambiente em 40°C e umidade relativa a 60%. Primeiro passo, resfriar até o seu ponto de orvalho a 31°C com de umidade relativa em 100%. Segundo passo, resfriar até 6°C com a umidade relativa em 100%, para obter a umidade absoluta em 6 g de água por kg de ar. Terceiro passo, aquecer até os 25°C e obter como consequência, a umidade relativa em 30%. As linhas abaixo demonstram os processos.

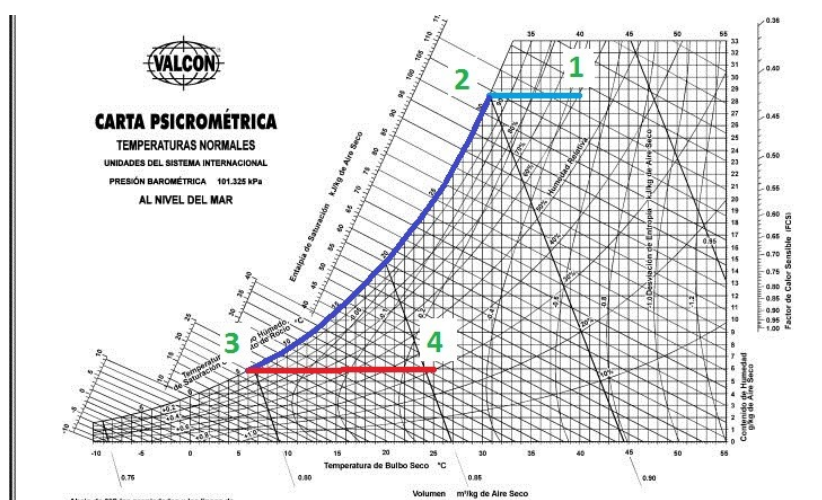


Figura 9 – Exemplo prático de um processo psicrométrico



### **3- Norma NBR ISO 1585: condições padrão de ensaio**

Esta Norma especifica um método de ensaio de motores projetados para veículos automotores. Ela se aplica à avaliação do seu desempenho, observando em particular, a apresentação das curvas de potência líquida a plena carga em função da rotação do motor, disposto em um dinamômetro de bancada medindo diretamente do eixo virabrequim.

Os métodos padrão para levar em conta os efeitos da condição do ar de admissão como previstos nas normas brasileiras são utilizados principalmente para corrigir a potência do motor submetido a diferentes tipos de ensaios. As condições do ar que entra no motor é uma função da pressão, temperatura e umidade, de referência do ar de admissão, de acordo com a NBR ISO 1585 [1], são:

- Pressão de 100 kPa, sendo que a pressão de ar seco é de 99kPa e a de vapor de 1kPa;
- Temperatura a 25°C;
- Umidade relativa de 30%.

## **4- Variáveis em testes de motores**

### **4-1- Condições de consumo de ar do motor**

O motor de combustão interna é uma máquina térmica cujo o fluido de trabalho é o ar. A função do combustível é o fornecimento de energia para o início da combustão.

### **4-2- Desempenho do motor**

O desempenho de um motor de combustão interna, depende de um vasto número de parâmetros, principalmente a quantidade de ar admitido, como por exemplo: mudança na taxa de compressão mudando a geometria do pistão, aumento do raio do virabrequim, comandos de válvulas com maior tempo de abertura na admissão ou sobrealimentação de ar aproveitando a energia dos gases e exaustão expandidos em um turbo-compressor. Quanto maior a massa de ar admitida, maior é a quantidade de combustível pode ser injetada pelo maior tempo de abertura dos bicos injetores, sendo controlada pela central de gerenciamento eletrônico de combustível com a informação do valor do sensor lambda (relação ar/combustível). Portanto, uma maior quantidade de energia admitida, maior será a potência desenvolvida.

A potência é calculada devido o torque com a capacidade de atuar sob certa carga a uma rotação determinada. A pressão média efetiva é definida como razão entre o trabalho realizado, em um ciclo, dividido pelo volume do cilindro deslocado.

### 4.3- Temperatura

A influência da temperatura do ar de admissão na potência do motor, está diretamente relacionada à mistura ar/combustível e a massa específica varia inversamente com a temperatura absoluta.

No caso de um motor a Diesel normalmente aspirado, com uma taxa de 16:1 e um ar de admissão a 25°C, a temperatura da carga no início da compressão será tipicamente de 50°C. No final da compressão a temperatura pode chegar a 530°C. Se aumentasse o ar admitido em 10°C, no final da combustão temos o valor de 560°C. Com essa mudança de temperatura, pode ter um efeito significativo na formação de óxidos de nitrogênio na câmara de combustão [4]

Para as temperaturas mais elevadas, aumenta-se a tendência da pré-detonação, chamado *knocking*, contribuindo a uma perda de rendimento volumétrico.

### 4.4- Umidade

A umidade relativa é um fator importante no desempenho do motor, porém não comparável à importância da variação da temperatura. O vapor d'água presente no ar atmosférico exerce influência na pressão interna na câmara de combustão, pois proporciona um acréscimo na pressão interna. Assim, um aumento da umidade relativa do ar, proporciona uma massa de ar/combustível com mais partículas de água. Essas partículas se vaporizam, quando submetidas a altas temperaturas no interior na câmara de combustão, aumentam a pressão local.

Outro ponto importante é que maior a umidade, menor será a quantidade de oxigênio para a combustão, pois está ligado quimicamente com o hidrogênio, não utilizado na combustão. No motor a Diesel, tem um efeito significativo sobre a formação de gases  $\text{NO}_x$  [4].

## 5- Dimensionamento e especificação do sistema de controle

O projeto de um condicionador de ar é um processo térmico que envolve aplicações de princípios da física, termodinâmica e transferência de calor. Seus limites de operação são calculados de acordo com as áreas térmicas, esquemas eletroeletrônicos, determinando essas restrições, têm a influência do seu comportamento solicitado pelo motor.

O objetivo deste equipamento como todo, proporciona que as condições padrão de temperatura e de umidade sejam atingidas durante o ano todo em qualquer estado do ar ambiente. Estão incluídos os processos em ordem: resfriamento, aquecimento e umidificação. Cada unidade de condicionamento terá: transdutor de temperatura, transdutor de temperatura e umidade relativa e um controlador PID para atender a norma NBR ISO 1585 [1].

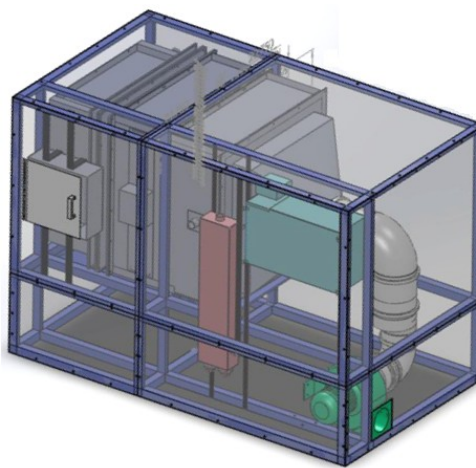


Figura 10 - Condicionador montado, desenhado em SolidWorks

Cada componente será descrito abaixo e posteriormente mostrado em uma figura esquematizada sobre as instalações dos sensores.

- Filtro de ar: será o primeiro elemento que o ar ambiente entrará em contato para melhorar a qualidade, eliminando partículas de sujeira evitando assim qualquer problema na câmara de combustão;
- Trocador de calor: equipamento com tubos aletados com água gelada fornecida pelo *chiller* (isopor com água gelada e bomba d'água), com a função de diminuir a umidade absoluta do ar como primeiro processo de condicionamento;
- Válvula proporcional motorizada: esta válvula regula a vazão e prioriza a eficiência do sistema de abastecimento de água gelada para a serpentina;
- Persianas com direcionadores do fluxo de ar, promovendo uma proteção da radiação das resistências para a serpentina de água gelada e com finalidade de aumentar a turbulência para melhorar a troca de calor nos próximos processos do ar.
- Aquecedor elétrico: segundo processo de condicionamento utiliza resistências elétricas aletadas, permite controlar a umidade relativa devido ao aquecimento e atingir a temperatura da norma NBR ISO 1585 [1];
- Umidificador: consiste na umidificação do ar através da vaporização saturada da água, seu controle é devido à injeção de umidade, este é o terceiro processo de condicionamento do ar;
- Ventilador: responsável pelo insuflamento do ar para admissão do motor, ele é instalado na parte final do condicionador.

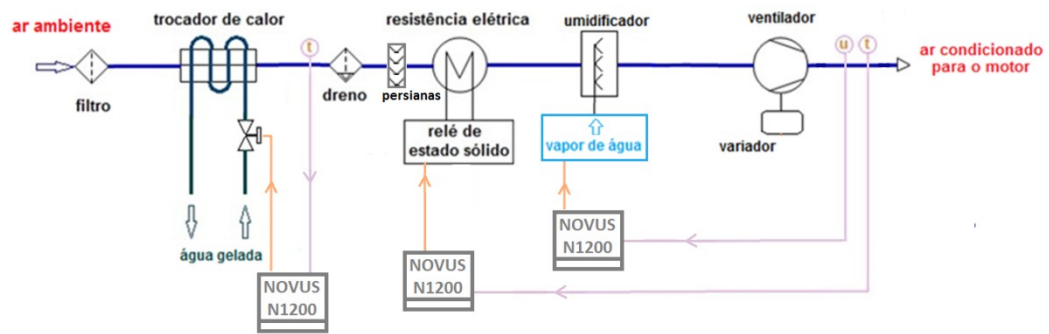


Figura 11 - Condicionador esquematizado, transdutores e controladores

Atender a norma NBR ISO 1585 [1] certifica que o valor da temperatura do ar de admissão em 25°C e a umidade relativa de 30%. O desenvolvimento deste sistema de condicionamento baseado nos processos psicrométricos do ar, com ajuda da carta psicrométrica. As etapas são:

- Resfriar até que a temperatura atinja o ponto de orvalho, com  $U_r=100\%$ ;
- Desumidificação através da queda de temperatura, o ar precisa estar em torno de 6°C para garantir a umidade absoluta em 6 gramas de água por kg de ar;
- Neste momento a umidade relativa continua em 100% e para adequar este fator, as resistências elétricas aquecem do ar para atingir os 25°C e consequentemente a umidade relativa em 30%;
- Em último caso, há um vaporizador de água para correção da umidade.

Cada processo de condicionamento terá um atuador automático que modifica cada parâmetro de controle de acordo com a necessidade de manter as condições-padrão durante o ano todo, independente da estação, temperatura e umidade.

Os equipamentos para controle, no caso do condicionamento do ar são: vazão de água gelada, potência das resistências elétricas de aquecimento e a vazão do vapor de umidificação.

As principais funções deste condicionador de ar são: resfriamento com o papel de baixar a umidade absoluta, aquecimento para adequar a temperatura e umidade relativa, caso necessário a umidificação com o vaporizador de água.

### 5.1- Serpentina de água gelada

Os trocadores de calor que utilizam como fluido de trabalho a água gelada fornecida pelo *chillers*, passa pelos tubos a uma temperatura de 2°C a 6°C. Depois de realizar a passagem completa pela serpentina, o ar é resfriado e desumidificado para posteriormente retornar à caixa de isopor com o aumento de temperatura da água entre 15°C à 18°C. Assim começa um novo ciclo do sistema de água gelada.

Produzido pela FRIOTEC [2], utiliza filtro de ar do tipo gaveta, os tubos são de cobre e aletas em alumínio, possui separador de gotas para impedir o arrasto das gotas condensadas, bandeja e dreno para o escoamento de água condensada.



Figura 12 - Serpentina de água gelada



A sua capacidade de troca de calor, é calculada pela água gelada que flui entre as tubulações aletadas. Este calor em kW é representado pela expressão abaixo [3]:

$$Q_{Sag} = V_{ag} \cdot \rho_{ag} \cdot c_{p,ag} (T_{ag,e} - T_{ag,s}) \quad (21)$$

Onde:  $V_{ag}$  é a vazão volumétrica de água gelada fornecida pela bomba d'água em  $[m^3/s]$ ,  $\rho_{ag}$  é densidade da água em  $[kg/m^3]$ ,  $c_{p,ag}$  é o calor específico a pressão constante em  $[kJ/kg.K]$ ,  $T_{ag,e}$  e  $T_{ag,s}$  são as temperaturas de entrada e saída da serpentina.

Como preocupação de eficiência do sistema de água gelada, a  $T_{ag,e}$  está relacionado diretamente com a potência consumida pelo compressor do *chiller*. Por isso, haverá um controle de temperatura após a serpentina com um sensor de temperatura. A temperatura da água que sai do *chiller* não pode ser inferior a  $1,0^\circ C$  para não ocorrer o congelamento. A variação da temperatura influencia na temperatura e umidade absoluta do ar saindo da serpentina, assim como dimensionamento da serpentina e seleção da potência de bombeamento.

Para obter uma maior troca de calor entre a água gelada e o ar, o trocador segue a configuração em contracorrente, onde a água mais fria entra em contato com o ar mais frio e o parte do ar mais quente encontra com a água mais quente.

O dimensionamento deste trocador de calor, de acordo com o fabricante, os detalhes são destacados abaixo [2]:

- A velocidade média que o ar deve passar por este condicionador será de 2,75 m/s, pois assim evita a mistura do condensado da superfície molhada e a velocidade da água em 2,5 m/s ou menor para obter uma maior eficácia de troca de calor. Com esses dados, calcula-se a área transversal  $A_{Sag}$  ;
- Com a carga térmica, calcula-se a capacidade de resfriamento e desumidificação por  $m^2$  da área transversal,  $Q_{Sag}/A_{Sag}$ ;
- Dessa forma, determina-se a temperatura de entrada da água gelada  $T_{ag,e}$  , relacionado com a temperatura de ar requerido pela norma NBR ISO 1585 [1] na saída da serpentina  $T_{ar,g,s}$ ;
- Quanto for maior variação de temperatura da água gelada, maior será o trabalho e vazão de bombeamento, proporcionando maior velocidade de água entre os tubos e um maior coeficiente de transferência de calor;
- A queda de pressão não deve ultrapassar os 69 kPa. Normalmente uma queda de 30 kPa através da serpentina é considerado adequado para a sua função e assim manter a potência da bomba e custo energético razoáveis. A velocidade de água gelada  $v_{ag}$  vai estar entre 0,6 m/s e 0,8 m/s e alguns fabricantes fornecem a fórmula para calcular a  $v_{ag}$  de acordo com o espaçamento entre as aletas;

Por processo de transferência de calor, quanto menor variação da temperatura da água gelada, maior quantidade de água que flui pela serpentina. Normalmente a temperatura irá entrar de 2°C à 5°C. Os *chillers* trabalham com água à 3°C, satisfatório para o sistema funcionar.

A vazão máxima deste projeto, é para um motor de compressão interna, de potência líquida até 150cv, de 800 m<sup>3</sup>/h. Considerando um ar ambiente de 35°C, umidade relativa de 50% e umidade absoluta a 19 g H<sub>2</sub>O/ kg de ar, a temperatura de

orvalho é de 23°C e o ar seco no final à 6°C com a umidade absoluta em 100%. Espera-se que a água gelada entre a 6°C e sai à 12°C.

As propriedades do ar para serem consideradas para o cálculo de dimensionamento são: massa específica do ar  $\rho_{ar} = 1,2 \text{ kg/m}^3$  e calor específico  $c_{p,ar} = 1,02 \text{ kJ/kg.K}$ .

As propriedades da água gelada para uma média de 9°C: massa específica  $\rho_{ag} = 1000 \text{ kg/m}^3$  e calor específico  $c_{p,ag} = 4,187 \text{ kJ/kg.K}$ .

Considerando uma serpentina com dutos aletados, com uma velocidade nominal do ar a  $v_{ar} = 2,75 \text{ m/s}$ , a área transversal será calculado abaixo:

$$A_{Sag} = \frac{V_{ar}}{v_{ar}} = \frac{800 \cdot 3600}{2,75} = 0,081 \text{ m}^2 \quad (22)$$

Para efeito de cálculo, será considerado o valor da temperatura de 40°C e Ur= 60%, a entalpia do ar seco é de 117 kJ/kg. Para condicionar o ar com o outro extremo de 6°C e Ur=100%, sua entalpia é de 21kJ/kg. Todos os valores ao nível do mar. A capacidade térmica deste trocador de calor e de desumidificação:

$$Q_{Sag} = V_{ar} \rho_{ar} h_{ar,e} - h_{ar,s} = \frac{800}{3600} \cdot 1,2 \cdot (117 - 21) \quad (23)$$

$$Q_{sag} = 25,60kW \approx 20.000kcal/h \quad (24)$$

## 5.2- Bomba d'água

A seleção de uma bomba d'água para alimentar a serpentina foi configurada pelos seguintes dados:

- É considerável que a queda de pressão da serpentina gelada será de 30 kPa;
- Podendo operar durante o ano todo, com maiores valores de temperatura do ar, a serpentina pode trabalhar com  $V_{ag} = 5,5 m^3/h$  com o extremo de  $V_{ag} = 7,5 m^3/h$ ;

A bomba para atender esses quesitos, foi uma da WEG de 3 cavalos, com 36mca de pressão e na sua rotação máxima, pode atingir  $V_{ag} = 10 m^3/h$ . Mas haverá um controle de vazão pelas limitações da serpentina, com uma válvula proporcional e um controlador PID permitindo atingir uma melhor eficiência do conjunto bomba e serpentina.



Figura 13 – Bomba Schneider com motor WEG

### 5.3- Aquecedor elétrico

O aquecedor elétrico utilizado são resistências aletadas para aumentar e melhorar a transferência de calor. Sendo o segundo condicionamento de ar, uma corrente elétrica passa através de um resistor com potencial elétrico que libera a energia em forma de calor para o fluxo de ar. Para evitar a irradiação de calor para a serpentina de água gelada, foi instalado um conjunto de aletas para separar esses dois sistemas de condicionamento, melhorar a turbulência e direcionar o ar de um para o outro.

Confeccionado pela empresa TORKTEC [8], é de aço galvanizado e isolado com lã de vidro, resistências tipo “U” aletadas.



Figura 14 – Aquecedor elétrico

Para um bom funcionamento do sistema de aquecimento, de acordo com Wang [10], o projeto e instalação devem seguir alguns passos como:

- As resistências elétricas devem ser alocadas de acordo com o fluxo de ar para uma melhor distribuição de calor;

- Um sistema de segurança para cortar a corrente elétrica, caso o ventilador não estiver funcionando;
- Um controle para suspender a atuação devido a sobrecarga ou uma reinicialização automática.
- Estes dispositivos devem estar aparentes para qualquer tipo de problema.

Dimensionamento desse condicionador, é calculado sua capacidade térmica de aquecimento  $Q_{re}$  em kW, como [3]:

$$Q_{re} = V_{ar} \rho_{ar} c_{p,ar} (T_{ar,s} - T_{ar,e}) \quad (25)$$

Onde  $V_{ar}$  é a vazão volumétrica do ar em  $[m^3/s]$ ,  $\rho_{ar}$  é a massa específica do ar em  $[kg/m^3]$ ,  $c_{p,ar}$  é o calor específico do ar em  $[kJ/kg.K]$ ,  $T_{ar,s}$  e  $T_{ar,e}$  são as temperaturas de saída e entrada do ar que passa nas resistências elétricas em  $[^{\circ}C]$ .

Segundo os processos psicrométricos, o ar chega às resistências elétricas a  $6^{\circ}C$ , após o processo de desumidificação o aquecimento é necessário para adequar a humidade relativa, então a temperatura de saída do ar depois do aquecimento é de  $30^{\circ}C$  de acordo com o projeto pela norma NBR ISO 1585 [1]. Assim, o calor necessário é:

$$Q_{re} = V_{ar} \rho_{ar} c_{p,ar} T_{ar,s} - T_{ar,e} = \frac{800}{3600} \cdot 1,2.1,02. (30 - 6) \quad (26)$$

$$Q_{re} = 6,46 \text{ kW} \quad (27)$$

O controle das resistências será realizado por um controlador PID que irá acionar as chaves estáticas ou relés para regular a potência necessária de acordo com o set up configurado, garantindo a precisão do controle da temperatura em conjunto com o sistema de condicionamento.

#### 5.4- Umidificador

Responsável por corrigir a falta de umidade relativa do ar. As maneiras diferentes de realizar o aumento da umidade são: injetar vapor saturado de água, atomizar, pulverizar, forçar o fluxo de ar por um elemento molhado ou compartimento com água evaporando-a. O fator importante do umidificador é a capacidade de umidificação ou taxa de vapor d'água  $m_{vap}$ .

A taxa de umidificação  $m_{vap}$  é em kg/h. A quantidade de vapor de água necessário para atingir a umidade relativa determinada pela norma NBR ISO 1585 [1] pode ser calculado pela expressão:

$$m_{vap} = 3600V_{ar}\rho_{ar} \omega_{ar,s} - \omega_{ar,e} \quad (28)$$

Onde  $V_{ar}$  é a vazão volumétrica do ar em  $[m^3/s]$ ,  $\rho_{ar}$  é a massa específica do ar em  $[kg/m^3]$ ,  $\omega_{ar,s}$  e  $\omega_{ar,e}$  é a umidade absoluta do ar na saída e entrada pelo umidificador em  $[kg_{vap}/kg_{ar}]$ .

Dos diversos métodos de umidificação do ar, neste projeto será utilizado um elemento umidificador de aquecimento e vaporização da água por possuir as seguintes vantagens:

- Capacidade de umidificação de pequeno e grande porte;
- Por sua configuração não há risco de supersaturação;
- Baixo custo de manutenção;
- O tamanho está de acordo com a figuração geral do condicionador;
- Boa resposta no controle da umidade.

Produzido pela empresa TORKTEC [8], em aço zincado, possui bandeja de drenagem, o tudo difusor de 1" de diâmetro em alumínio.



Figura 15 – Umidificador



Simplificando o condicionador de umidificação, possui três elementos funcionais: o reservatório de água, o tanque com as resistências elétricas para vaporização da água e o tubo difusor de vapor. Funciona da seguinte forma: o reservatório fornece água de acordo conforme a necessidade do tanque com as resistências, com o calor produzido no tanque, o vapor é direcionado ao difusor que é responsável pelo aumento da umidade no fluxo de ar.

Pelo projeto para atender a norma NBR ISO 1585 e o ar que sai do condicionador com uma umidade absoluta de  $0,025 \text{ kg}_{\text{vap}}/\text{kg}_{\text{ar}}$  e entra à  $0,003 \text{ kg}_{\text{vap}}/\text{kg}_{\text{ar}}$ , é calculado da seguinte forma:

$$m_{\text{vap}} = 3600.800.1,2. 0,025 - 0,003 \quad (29)$$

$$m_{\text{vap}} = 21,12 \text{ kg/h} \quad (30)$$

Calculado a vazão mássica de vapor, pode calcular a capacidade da resistência elétrica imersa no tanque de água. Considerando a pressão atmosférica e a temperatura de aquecimento à  $110^\circ\text{C}$ , a entalpia é de  $2696 \text{ kJ/kg}$ . A água disponível para vaporização está a  $25^\circ\text{C}$ , a entalpia é de  $104 \text{ kJ/kg}$ . A potência das resistências é calculada abaixo:

$$P_{aq} = \frac{21,12}{3600} \cdot (2696 - 104) \quad (31)$$

$$P_{aq} = 15kW \quad (32)$$

## **6- Controle e automação**

Esse conjunto de controle visa manter as condições padrão solicitada pela norma NBR ISO 1585 constantes de temperatura e umidade, independente das condições atmosféricas do ar ambiente e pela solicitação de vazão de ar consumida pelo motor testado.

### **6.1- Controle da temperatura**

Para controlar somente a temperatura de ar, devemos ter um excesso de ar através da serpentina de água gelada e depois de um duto flexível que termina no sistema de admissão do motor, deve ser projetado para abastecer a uma vazão constante, calculada pela duplicação da demanda. Quando a vazão é constante, haverá um bom controle da temperatura.

### **6.2- Controle da umidade**

Deve se considerar os limites de operação quando se trabalha com diferentes níveis de umidade, a fim de evitar o acúmulo de condensação no sistema. Dutos corrugados não devem ser usados, pois o condensado tende a acumular.

Todas as unidades de condicionamento deste tipo devem estar instaladas linhas de drenagem para não causar problemas significativos durante o funcionamento da unidade.

### 6.3- Dispositivos de atuação

Estes são os responsáveis pela modificação do estado dos equipamentos de controle, a partir dos sinais recebidos pelo controlador.

Os principais dispositivos de atuação nos sistemas de condicionamento de ar são:

- Inversor de frequência: este dispositivo vai atuar no ventilador;
- Bomba d'água: com a funcionalidade de fornecer água gelada para serpentina;
- Válvula proporcional: regular a vazão da água gelada;
- Serpentina de água gelada: vai atuar na diminuição da umidade relativa;
- Drenos: sistema responsável pela retirada de água do condensado do ar.
- Aquecedor: vai adequar a temperatura após a retirada do vapor d'água;
- Umidificador: aumento de umidade do ar;
- Ventilador: responsável pelo transporte de ar;
- *Chillers*: neste caso será utilizada uma caixa de isopor com uma grande massa de gelo para o fornecimento de água gelada.

### 6.4- Dispositivos de detecção

Estes equipamentos eletrônicos são instalados devido sua importância de retornar sinais do estado do sistema de condicionamento. Os transdutores de temperatura e umidade presentes são os responsáveis por manter uma malha fechada de informações para os controladores PID e deles, fornecer outro grupo de sinais elétricos para garantir que todo o sistema funcione de acordo com a norma NBR ISO 1585 [1].

Os transdutores e controladores utilizados são:

- Transdutor de humidade e temperatura Omega HX94: será o sensor-chave instalado no final do condicionador para retornar informações que o ar está de acordo com a norma, também são chamados de higrômetro;
- Transdutor de temperatura PT100: instalado após a serpentina, servirá como um controlador de vazão da água gelada para uma maior eficiência energética do sistema;
- Controladores de temperatura NOVUS modelo N1200 com conexão USB para sua configuração via computador, controle PID auto-adaptativo.

### **6.5- Controlador**

Neste projeto do condicionador de ar, todos os dispositivos listados terão um dispositivo de comando. De acordo com as informações fornecidas pelos sensores, o controlador irá retornar sinais ao sistema auxiliar, até obter a estabilidade das condições padrão atingidas.

A automatização desses equipamentos pode ser controlada pela interface de um computador e posteriormente integrada aos programas de testes de motores.

A monitorização dessas variáveis apresentadas anteriormente (temperatura e umidade) pode ser analisada pelos mostradores dos controladores PID. São ao todo três controladores PID.

### 6.5.1- Classificação dos controladores

Esses dispositivos recebem sinais eletrônicos para eles atuarem no controle. A aquisição desses sinais é realizada pelos sensores e assim com o processo desses dados, envia os sinais de saída para os equipamentos de atuação.

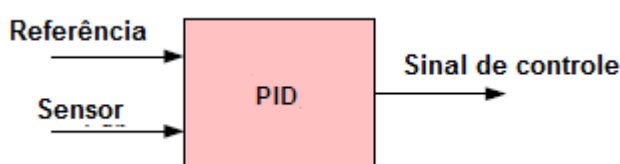


Figura 16 – Modo de trabalho de um controlador

O controlador digital recebe sinais eletrônicos dos sensores de detecção, converte os sinais em variáveis digitais e realiza operações lógico-matemáticas no processador com o tipo de ação corretiva em sinal gerado na saída para uma alteração da variável de controle.

### 6.5.2- Tipos de controle

- Adaptativo: busca a melhoria do sistema pela monitoração das variáveis, dependendo do critério usado, muda os parâmetros para diminuir o tempo de resposta, eficiência no consumo energético e outros;
- *Step-control*: em duas posições de extremo controle, ele aciona sucessivamente na tentativa de ter um controle proporcional aproximado;
- *On-off*: Atuador que assume somente duas posições, ligado ou desligado, máximo ou mínimo.

- Proporcional: dispositivo que processa através da diferença do valor medido e seu erro. Descrito pela expressão:

$$var_{prop} = G_P \cdot e \quad (33)$$

Onde " $var_{prop}$ " é a informação de saída do controlador, " $G_P$ " é o ganho proporcional e p " $e$ " o erro.

- Proporcional Integral: neste caso tem um novo termo na expressão do controle que é a integral relacionada ao erro. Representado abaixo:

$$var_{prop} = G_P \cdot e + G_I \cdot \int e dt \quad (34)$$

Onde " $G_I$ " é o ganho integral e " $t$ " é o tempo do período durante o erro existir, quanto maior valor do tempo, maior será o valor de saída do controlador para tentar eliminar o erro;

## 6.6- Controlador Proporcional Integral e Derivativo (PID)

Os controladores instalados no sistema de condicionamento são do tipo PID. O controle tem uma parcela sobressalente do controle Proporcional Integral, pois a

finalidade do termo derivativo proporciona um melhor controle de antecipar a forma da variação do erro.

A equação de um PID é calculada pela seguinte forma:

$$var_{prop} = G_P \cdot e + G_I \cdot e dt + G_D \cdot \frac{de}{dt} \quad (35)$$

Onde o termo " $G_D$ " é o ganho derivativo e " $\frac{de}{dt}$ " é a derivada do erro pelo tempo. A adição deste termo garante resultados mais satisfatórios nas malhas fechadas de controle, pois ele é mais sensível a ruídos dos sinais.

O aumento do ganho proporcional  $G_P$  diminui o erro do regime estacionário, tem como resposta um valor oscilatório. Simplificando, ele melhora o desempenho no regime estacionário e diminui o tempo de resposta.

A ação do ganho integral tem como função de zerar o erro do regime estacionário, é utilizada quando a resposta transiente é aceita e em regime estacionário seja insatisfatório. Mesmo que remova o erro, a resposta final pode ser oscilatória com frequência crescente ou decrescente, normalmente indesejáveis.

A parte derivativa  $G_D$  atua pela taxa de variação do erro, realizando a correção do mesmo antes de se tornar expressivo. A antecipação da correção aumenta a estabilidade do controle.

O sucesso do uso dos controladores PID, depende do *setup* correto dos seus ganhos, a fim de aperfeiçoar o desempenho. Na prática, essa configuração será ajustada por especialistas ou engenheiros elétricos.



## 7- Desenvolvimento dos ensaios e resultados

Os primeiros testes foram realizados sem a adição de gelo para a serpentina de água gelada para testar as resistências e o umidificador. Todos os *setups* nos controladores são de temperatura e umidade relativa no final do condicionador. O primeiro teste teve como configuração a temperatura de 40°C e umidade relativa de 80%.

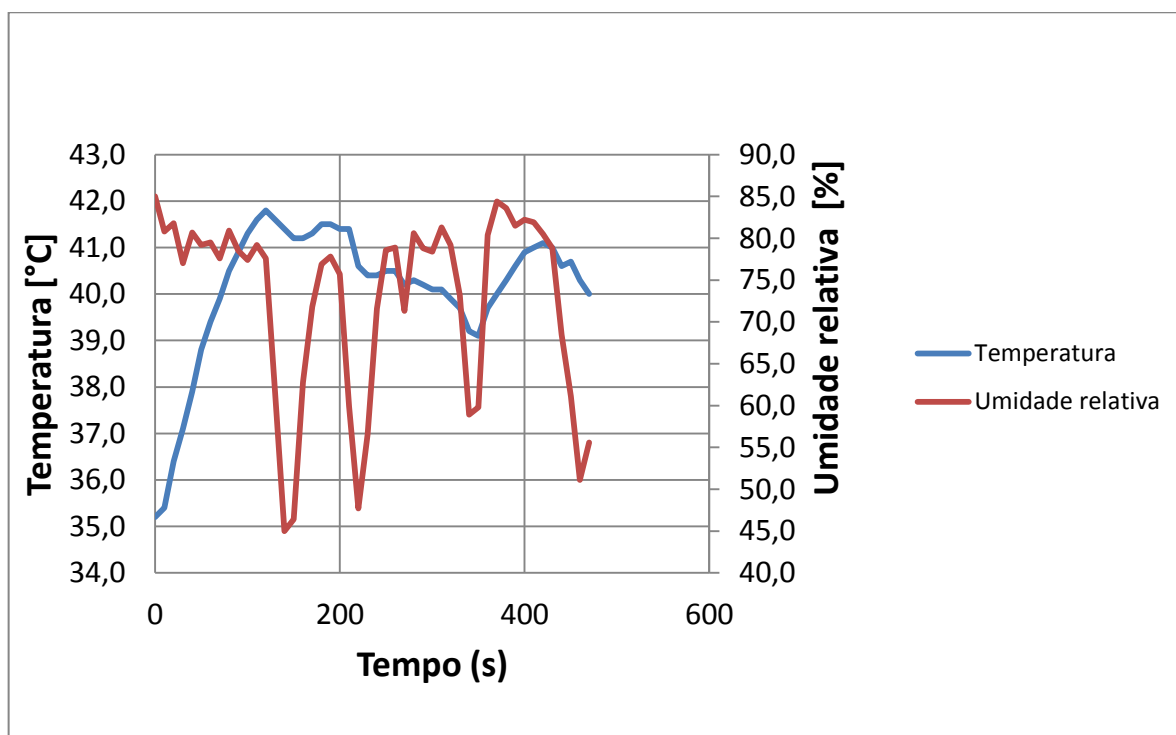


Figura 17 – Gráfico do teste 01: T= 40°C e Ur= 80%

Como foi o primeiro teste, os controlados estavam realizando seus operadores lógico-matemáticos para realizar o controle. Analisando o gráfico, houve uma variação considerável, devido ao início de controle. Neste caso, conectamos os controladores no

computador para realizar uma sintonia fina para os valores de ganho proporcional e obter uma melhor estabilização do sistema.

O segundo teste, configuramos os controladores para  $T = 40^{\circ}\text{C}$  e  $Ur = 65\%$  para entender se haverá o controle devido ao novo *setup*.

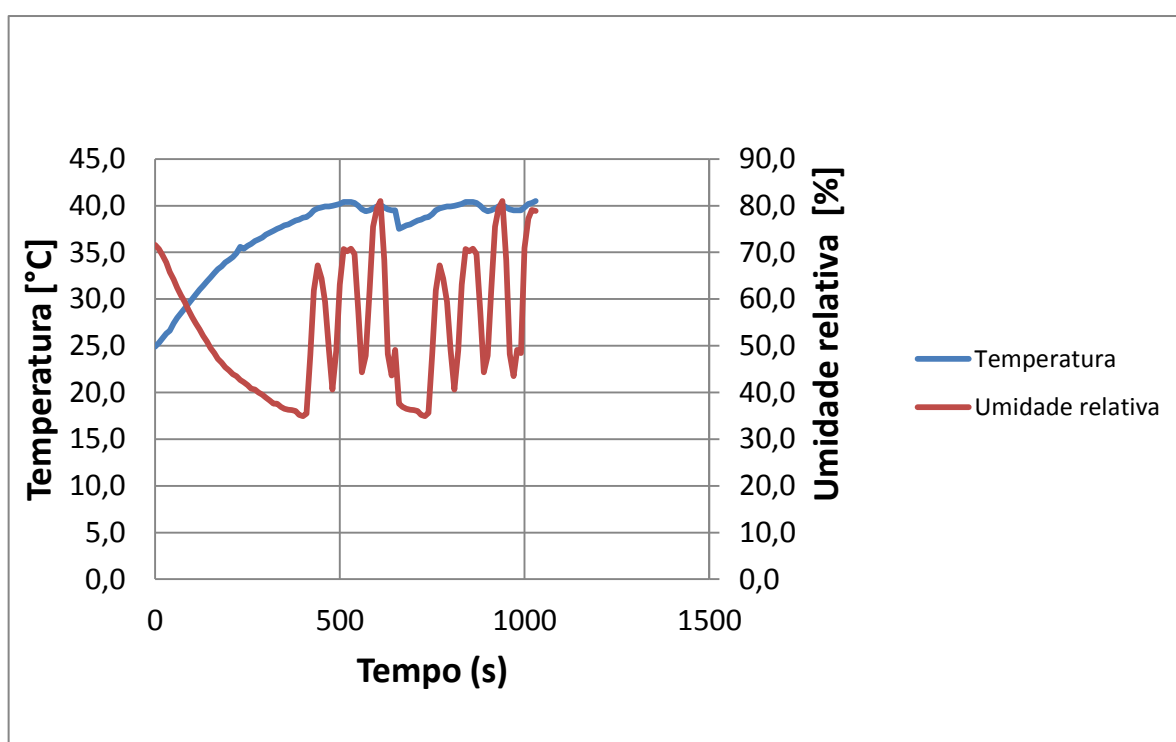


Figura 18 – Gráfico do teste 02:  $T = 40^{\circ}\text{C}$  e  $Ur = 65\%$

Nesta segunda fase com os novos valores dos ganhos, obteve um melhor controle na temperatura, porém a umidade não tinha estabilidade.

No tanque de água para a produção de vapor, há duas resistências de aquecimento de 7kW. Com a instabilidade na adição da umidade e com a nova configuração do ganho no controlador, teve a decisão de desligar uma das resistências para que o aquecimento da água seja menos brusco, a fim de obter um melhor controle.

O terceiro teste, o umidificador está com uma resistência ligada. Em pouco tempo de operação, demonstrou uma melhor estabilidade e controle. Deste vez, foi configurado para  $T= 30^{\circ}\text{C}$  e  $Ur= 75\%$ .

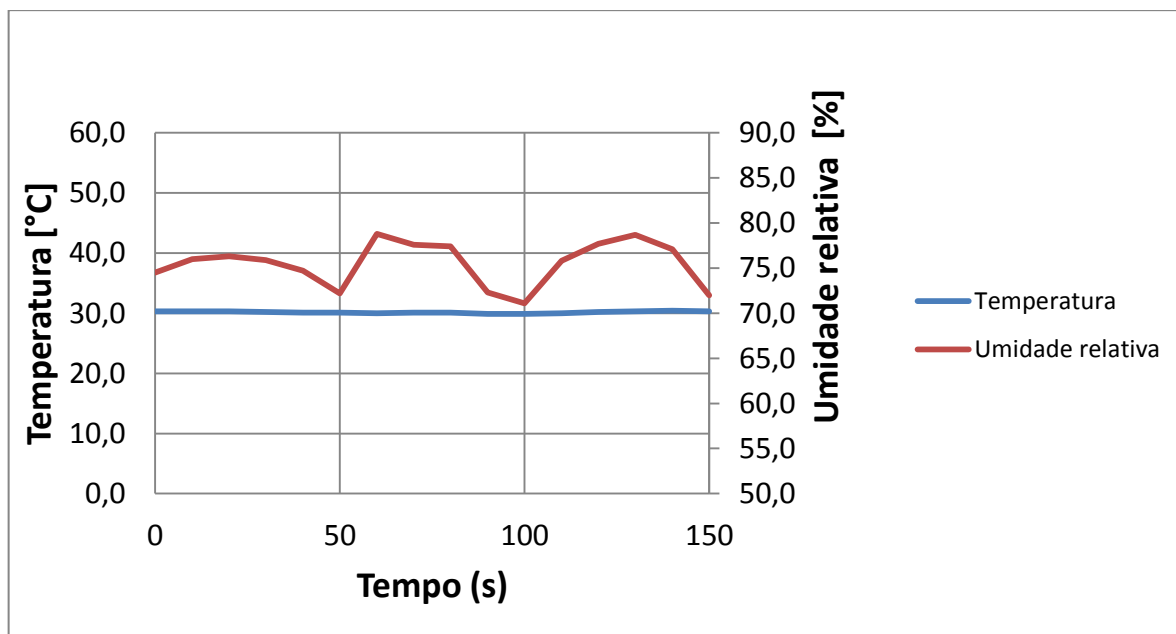


Figura 19 – Gráfico do teste 03:  $T= 30^{\circ}\text{C}$  e  $Ur= 75\%$

Como mostrado no gráfico anterior a melhora de controle dos parâmetros de temperatura e umidade, será realizado o teste final com a adição de gelo no isopor para a serpentina de água gelada realizar sua função, desumidificar devido a refrigeração.

O último teste será configurado nos controladores, os parâmetros para serem atingidos e atender a Norma NBR ISO 1585 [1]:  $T= 25^{\circ}\text{C}$  e  $Ur= 30\%$ .

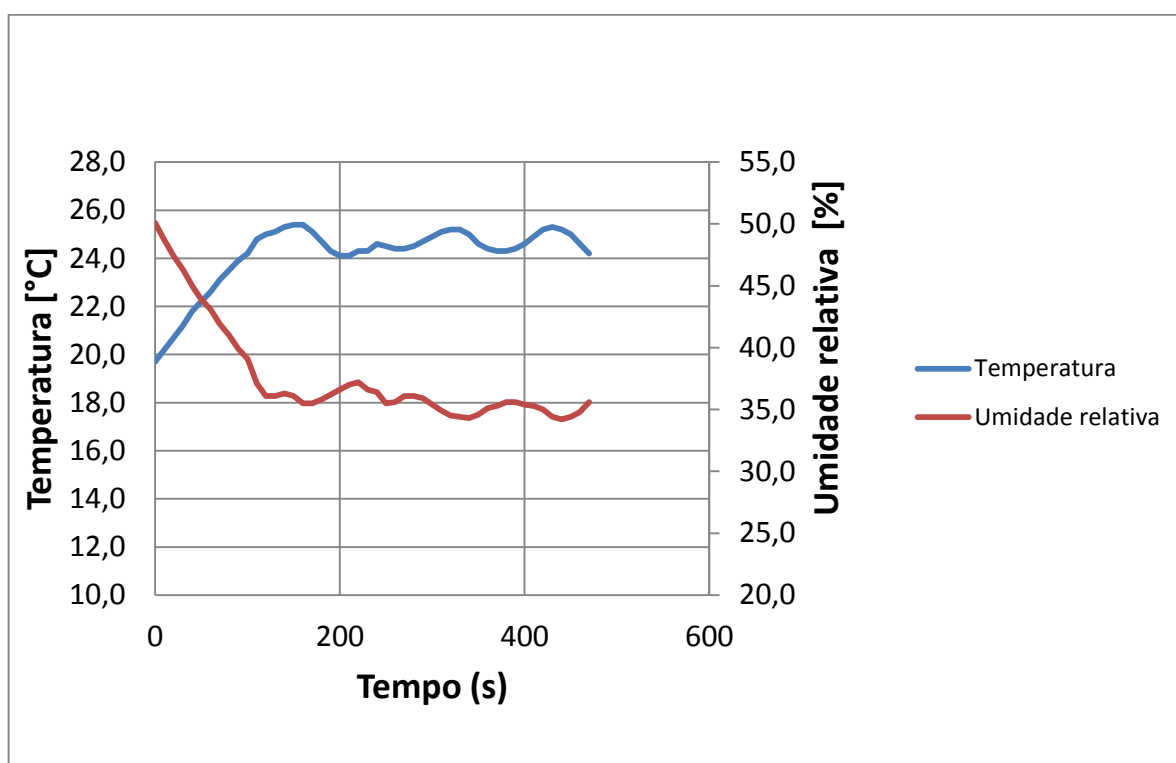


Figura 20 – Gráfico do teste 04: T= 25°C e Ur= 30%

Neste teste, o controle alvo era atingir as condições padrão da Norma NBR ISO 1585. Ficou satisfatório o controle da temperatura que variou entre 24,3°C e 25,3°C. A variação da umidade relativa ficou estável em todo o procedimento entre 34,2% a 36,6%, porém não chegou ao desejado 30%.

## **8- Conclusões**

O resultado final foi satisfatório, pois todo o sistema está operando em conjunto em qualquer configuração dos controladores. Infelizmente a umidade relativa padronizada não foi alcançada devido a outros fatores além da automação do condicionador. Será descrito melhorias do sistema abaixo.

### **8.1- Sugestões de melhorias e trabalhos futuros**

Após realizar uma análise de todo o conjunto em operação, alguns pontos necessitam de melhorias e modificações.

A serpentina de água gelada, mesmo que a temperatura da Norma seja atendida, precisa ser mais eficiente. Caso a temperatura do ambiente seja maior, o poder de refrigeração será baixo e não conseguir retirar toda a umidade necessária. A temperatura de entrada da água gelada foi de 2°C e na saída de 7°C e mesmo assim, não foi capaz de realizar a troca de calor com rapidez. A sugestão será uma nova configuração de serpentina: tubos com diâmetro menor e maior número de tubos.

A resistência elétrica tem grande dificuldade de aquecer o ar de 6°C para 25°C. Tem que realizar novos cálculos para obter um sistema de aquecimento mais eficaz, atingindo a temperatura da Norma sem grandes dificuldades. Instalar resistências de maior potência.

O sistema de umidificação foi resolvido entre os testes, porém ficou concluído que com as duas resistências ligadas, o aquecimento é brusco e o controle inviável. Será necessário um novo cálculo para adição de umidade funcionar estavelmente.

## 9- Referências bibliográficas

1. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR ISO 1585, Veículos rodoviários – Código de ensaio de motores – Potência líquida efetiva, 1996;
2. Grupo Friotec, trocadores de calor (ar/água), <http://www.grupofriotec.com.br>;
3. Incropera; DeWitt; Bergman; Lavine; Fundamentos de transferência de calor e de massa, Ed. LTC.
4. Martyr, A. J.; Plint, M. A. , “*Engine Testing: Theory and Practice*”, Ed. Elsevier, 2007;
5. Medidas de umidade - <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap5/cap5-5.html>
6. Nasa fact sheet - <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>
7. Potter, M. C.; Scott, E. P.; Termodinâmica.
8. Tork tecnologia aerotérmica, sistema de vaporização e aquecimento elétrico, <http://www.torktec.com.br>.
9. Wan Wylen, G.; Sonntag, R.; Borgnakke, C. , Fundamentos da Termodinâmica, Ed. Edgar Blucher, 1998.