

2

Revisão da literatura

2.1

Propriedades do ar

O ar atmosférico é resultado de um grande número de constituintes gasosos e contaminantes. Define-se “ar seco”, como o ar atmosférico de cuja composição se exclui o vapor de água. Quando ocorre a mistura de ar seco e vapor de água tem-se o chamado “ar úmido”. A composição do ar seco é relativamente constante sofrendo pequenas variações em função do tempo, posição geográfica e altitude, Moreira [4]. A Tabela 2.1 mostra a composição de uma amostra de ar seco.

Tabela 2.1: Composição aproximada do ar seco.

Gás	Proporção [%]
Nitrogênio, N ₂	78,08
Oxigênio, O ₂	20,95
Argônio, Ar	0,93
Dióxido de Carbono, CO ₂	0,03
Neônio, hélio, metano e outros	0,01

Fonte: Nasa Earth Fact Sheet [5]

Dado que o vapor de água no ar resulta principalmente da evaporação de água da superfície de várias massas de água, a umidade atmosférica é maior em regiões localizadas perto de grandes massas de água e menor nas regiões mais áridas [4].

A lei da mistura de gases perfeitos, ou lei das pressões parciais, observada por J. Dalton, Moreira [4], estabelece para qualquer mistura mecânica (i.e., que não se misturam quimicamente) de gases e vapores que: 1) cada gás ou vapor na mistura exerce uma pressão parcial individual que é igual à pressão que o gás poderia exercer se ocupasse o espaço sozinho, e 2) a pressão total da mistura gasosa é igual à soma das pressões parciais exercidas por gases individuais ou vapores.

O ar atmosférico, sendo uma mistura mecânica de gases, obedece à lei de Dalton. Portanto, a pressão barométrica total é sempre igual à soma das pressões parciais dos gases secos e a pressão parcial do vapor de água. Logo, a pressão total do ar, p , é igual à soma da pressão parcial do ar seco p_a e a pressão parcial do vapor de água p_v , conforme mostrado na Equação (2-1).

$$p = p_a + p_v \quad (2-1)$$

A relação entre a pressão, a massa específica e a temperatura do ar é descrito pela seguinte equação:

$$p = \rho_a \cdot R \cdot T \quad (2-2)$$

onde ρ_a é a massa específica do ar [kg/m^3], T é a temperatura do ar [K] e R a constante universal dos gases ideais para o ar [$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$].

A seguir, se faz uma revisão dos principais parâmetros psicrométricos do ar. Obtendo expressões simplificadas devido ao comportamento idealizado do ar úmido sob condições ambiente, que para a implementação de rotinas computacionais são muito úteis.

Umidade absoluta

A umidade absoluta ou teor de umidade do ar é a relação entre a massa do vapor de água presente no ar e a massa de ar seco. Usualmente é expressa em kg de vapor por kg de ar seco, Moreira [4].

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (2-3)$$

Uma importante simplificação pode ser feita quando a mistura é de dois gases perfeitos. Considerando a lei de mistura de Dalton, tem-se,

$$m_a = \frac{p_a \cdot V}{R_a \cdot T} \quad \text{e} \quad m_v = \frac{p_v \cdot V}{R_v \cdot T}$$

onde, V é o volume da mistura, R_i são as constantes particulares dos gases e p_i são suas pressões parciais. Substituindo essas relações na Equação (2-3) obtém-se,

$$\omega = \frac{R_a}{R_v} \cdot \frac{p_v}{p_a}$$

onde,

$$\frac{R_a}{R_v} = \frac{M_v}{M_a}$$

é a relação entre as massas moleculares do vapor e do ar seco, $M_v = 18,01534$ kg/kmol e $M_a = 28,9645$ kg/kmol, respectivamente. Logo, pode-se calcular a umidade absoluta do ar pela seguinte equação:

$$\omega = 0,62198 \cdot \frac{p_v}{p_a} \quad (2-4)$$

Uma vez que a pressão total da mistura p é dada pela soma das pressões parciais p_a e p_v obtém-se também,

$$\omega = 0,62198 \cdot \frac{p_v}{p - p_v} \quad (2-5)$$

A Equação (2-5) é a mais conhecida e muitas vezes apresentada como a da definição de umidade absoluta. Note-se que esta expressão decorre da hipótese da validade do comportamento ideal e que sua validade fica comprometida quando a pressão parcial do vapor se aproxima da pressão total de mistura.

Umidade relativa

A umidade relativa representa a relação entre a pressão parcial do vapor de água presente no ar, p_v , e a pressão de saturação do mesmo a uma mesma temperatura e pressão total de mistura, p_{sv} , conforme mostrado na seguinte expressão:

$$\phi = \frac{p_v}{p_{sv}} \quad (2-6)$$

A pressão de saturação ocorre quando se tem a máxima quantidade possível de vapor de água dissolvido no ar a uma temperatura dada. Neste caso, diz-se que o ar está saturado e adota-se essa condição para o cálculo da umidade relativa do mesmo, Silva [6].

Naturalmente, a umidade relativa varia entre 0 e 1 e, por isso, é comum fornecer o valor de ϕ em termos de porcentagem. Assim $\phi = 0\%$ está reservado para o ar seco, enquanto que $\phi = 100\%$ indica que o ar úmido está saturado.

Uma consequência dessa relação é a possibilidade de secagem do ar por refrigeração. Quando a temperatura é reduzida, a saturação percentual aumenta até a temperatura de ponto de orvalho onde qualquer outro resfriamento adicional resulta na deposição de umidade, condensação.

Temperatura de ponto de orvalho

A temperatura à qual o vapor de água do ar é saturado, é conhecida como a temperatura do ar em ponto de orvalho.

Em uma mistura gasosa de vapor de água e ar, quando o ar está a uma temperatura acima da temperatura de saturação correspondente à pressão parcial exercida pelo vapor de água, o vapor de água no ar será superaquecido. Por outro lado, quando o ar está à temperatura igual à temperatura de saturação correspondente à pressão parcial do vapor de água, o vapor de água no ar é saturado e o ar é chamado saturado (realmente o vapor de água é saturado), Silva [6].

Volume específico

O volume específico é obtido pela seguinte relação:

$$\nu_a = \frac{V}{m_a} \quad (2-7)$$

Sendo referido à massa de ar seco é dado pela razão entre o volume ocupado pela mistura e a massa de ar seco presente, Moreira [4].

Entalpia específica

A entalpia total da mistura é dada pela contribuição isolada da entalpia do ar seco e do vapor de água, dada a hipótese de validade de gases perfeitos, Moreira [4]. Assim,

$$H = H_a + H_v \quad (2-8)$$

A entalpia específica da mistura, h é obtida dividindo-se a expressão acima pela massa de ar seco, ou

$$h = \frac{H}{m_a} = \frac{m_a \cdot h_a + m_v \cdot h_v}{m_a}$$

e considerando a definição de umidade absoluta, tem-se a seguinte expressão para a entalpia específica da mistura:

$$h = h_a + \omega \cdot h_v \quad (2-9)$$

A entalpia específica é muito 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 adicionado ou removido.

Temperatura de bulbo seco e bulbo úmido

A temperatura de bulbo seco do ar é a temperatura medida por um termômetro comum com proteção contra a radiação. Se dois termômetros precisos forem colocados em uma corrente de ar em movimento rápido, ambos registrarão exatamente a mesma temperatura. Porém, se o bulbo de um dos termômetros for coberto com uma mecha molhada, a sua temperatura descerá primeiro rapidamente e depois lentamente até atingir um ponto estacionário. A leitura neste ponto é chamada a temperatura de bulbo úmido do ar. Sempre teremos uma temperatura de bulbo úmido menor que a temperatura de bulbo seco de ar. Isto se deve ao fato da umidade da mecha, a que promove transferência de calor do bulbo e evaporação, o que reduz a temperatura do termômetro, Silva [6].

Calor específico a pressão constante

O calor específico referido à massa de ar seco é dado pela combinação dos calores específicos do ar seco, c_{pa} , e o calor específico do vapor de água, c_{pv} , de acordo com,

$$c_p = c_{pa} + \omega \cdot c_{pv} \quad (2-10)$$

Esta relação pode ser obtida de forma semelhante ao método utilizado para obter a entalpia. Os seguintes valores para os calores específicos do ar seco e vapor de água serão utilizados:

$$c_{pa} = 1,006 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg-K}} \right] \quad \text{e} \quad c_{pv} = 1,805 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg-K}} \right]$$

Os valores das entalpias de referência são 0 kJ/kg para o ar seco e 0 kJ/kg para o líquido saturado (note-se que, na verdade, a água a 0°C está na fase sólida, porém é comum admitir que ela ainda está na fase líquida em uma condição chamada de metaestabilidade), Moreira [4]. Como o que interessa é a entalpia do vapor, deve-se somar à entalpia de referência a entalpia de vaporização da água, o que resulta em 2501,3. Assim, a entalpia específica da mistura é dada pela Equação (2-11), onde T representa a temperatura em °C.

$$h = 2501,3 \cdot \omega + (1,006 + 1,805 \cdot \omega) \cdot T \quad (2-11)$$

2.2

Processos de condicionamento de ar

Níveis de temperatura e umidade do ar, bem como as taxas de renovação do ar, devem ser observadas tanto nas salas de ensaio quanto no ar de admissão para o motor. Duas propriedades do ar de ventilação que entra em uma sala de testes (e particularmente, do ar de admissão que entra no motor) são de importância: a temperatura e o teor de umidade.

2.2.1

Processos psicrométricos

O estudo das propriedades e transformações sofridas pelo ar úmido nos processos de condicionamento é conhecido como psicrometria. Segundo Silva [6], as cartas psicrométricas são representações das propriedades psicrométricas do ar. O uso destas cartas permite a análise gráfica de dados e processos psicrométricos, facilitando assim a solução de muitos problemas práticos, que de outro modo requereriam soluções complexas. Na Figura 2.1 ilustra-se o esquema de uma carta psicrométrica típica. A explicação de cada linha ou escala é dada a seguir:

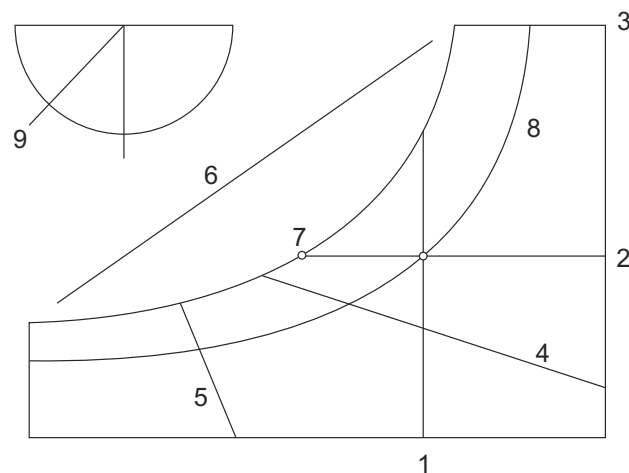


Figura 2.1: Principais propriedades do ar representadas na carta psicrométrica, mostrado por Silva [6].

1. Temperatura de bulbo seco, indicada na carta psicrométrica por linhas retas verticais [$^{\circ}\text{C}$].
2. Umidade absoluta, representada por linhas horizontais [kg_v/kg_a].
3. Escala da umidade absoluta.

4. Temperatura de bulbo úmido. A escala desta temperatura está localizada na linha de saturação na extremidade esquerda da carta [°C].
5. Volume específico [m^3/kg_a].
6. Entalpia específica [kJ/kg_a].
7. Temperatura do ponto de orvalho, na linha de saturação [°C].
8. Umidade relativa, expressada em porcentagem.
9. Escala referente ao fator de calor sensível.

Podem-se definir os processos psicrométricos como as mudanças ocorridas nas propriedades do ar durante o processo de condicionamento [1]. Os processos típicos para o condicionamento do ar são:

- umidificação;
- resfriamento;
- desumidificação;
- resfriamento e desumidificação;
- aquecimento;
- mistura de duas correntes de ar.

2.2.2

Controle de temperatura, pressão e umidade

Controle de temperatura

Para controlar somente a temperatura do ar, e ter um excesso de ar através de um duto flexível que termina no sistema de admissão do motor, a unidade de condicionamento deve ser projetada para abastecer ar a uma vazão constante, calculado pela duplicação da demanda de ar teórica máxima do motor [6]. Quando a vazão de ar é constante, um bom controle da temperatura pode ser alcançado.

O projeto de tal unidade deverá conter os seguintes módulos:

- ventilador e filtro de entrada;
- serpentinas de resfriamento;
- aquecedor, seja elétrico ou de água quente;
- válvula para o controle do fluxo;
- duto isolado, terminando em seção flexível e boquilha.

Segundo Greene et al. [7], mantendo a temperatura das serpentinas de resfriamento em um valor fixo, por exemplo 7°C, e aquecendo o ar à temperatura exigida, é possível reduzir o efeito de qualquer mudança na umidade durante os ensaios sem instalar um controle total de umidade.

Controle de pressão

Devido a que o consumo de ar do motor varia com a rotação e a carga, estes dois parâmetros podem variar mais rapidamente quando comparados à resposta de qualquer sistema de abastecimento de ar, e considerando que é essencial não impor mudanças de pressão no ar admitido, alguma estratégia de vazamento do ar em excesso no sistema de condicionamento tem de ser adotada para obter o controle da pressão com um grau de estabilidade da temperatura e umidade [7].

Controle de umidade

Nas unidades de condicionamento, nos quais são controladas tanto a umidade quanto a temperatura, devem-se considerar algumas restrições de operação quando se trabalha com diferentes níveis de umidade, a fim de evitar o acúmulo da condensação no sistema [7]. Dutos corrugados não devem ser utilizados em sistemas de condicionamento de ar úmido, devido a que o condensado tende a se acumular.

Os componentes necessários de uma unidade destas características são detalhados a seguir:

- ventilador e filtro de ar;
- aquecedor, seja elétrico ou de água quente;
- umidificador, composto por injetores de vapor ou água atomizada;
- elemento de resfriamento, ou fonte de água gelada;
- aquecedor secundário.

Todas as unidades de condicionamento deste tipo exigirão linhas de drenagem de condensado devido a que pode causar problemas significativos durante o funcionamento da unidade.

2.3

Condições e consumo de ar nos motores veiculares

O motor de combustão interna é essencialmente um “motor de ar” no qual o ar é o fluido de trabalho; a função do combustível é apenas no início da combustão mediante o fornecimento de energia para o funcionamento. Raramente há qualquer dificuldade técnica na introdução de combustível suficiente para o cilindro do motor, mas a potência atingível por esta máquina térmica está estritamente limitada pela carga do ar que pode ser aspirado [7].

2.3.1

Desempenho do motor

O desempenho do motor de combustão interna depende de um grande número de parâmetros, principalmente da quantidade de ar admitido. Quanto maior é a massa de ar admitida, maior é a quantidade de combustível que pode ser injetada, sendo controlada em sistemas com gerenciamento eletrônico pelo tempo em que o bico injetor de combustível permanece aberto e a pressão na linha de combustível. Portanto, para uma maior quantidade de ar admitido, maior a energia introduzida e maior a potência desenvolvida pelo motor [8, 9].

Um teste que analisa o desempenho do motor é resultado de diversas propriedades e conceitos aplicados ao desenvolvimento do motor que, se alteradas adequadamente, podem influenciar na potência e nas emissões de poluentes. Inicialmente tem-se o torque como a capacidade de carga de um motor, i.e., sua disponibilidade para realizar trabalho. Vale ressaltar que parte do torque produzido pelo motor é gasto para vencer o atrito nos mancais, nos pistões e nas demais peças do motor, também para efetuar a admissão da mistura ar-combustível e a descarga dos gases da combustão, sendo a parcela realmente disponível no eixo para carga denominada torque [8, 10].

A potência do motor é calculada como a taxa com que o torque é realizado por um motor. Segundo Heywood [8], a potência é a capacidade de atuar sob certa carga a uma velocidade determinada. A pressão média efetiva é definida como a razão entre o trabalho realizado, em um ciclo, dividido pelo volume do cilindro deslocado por ciclo. Esse parâmetro é uma pressão hipotética constante que seria necessária no interior do cilindro de um motor, durante um ciclo, para desenvolver uma potência efetiva [10]. O consumo específico é um parâmetro que mede a eficiência de um motor em transformar combustível em trabalho útil [8, 10], isto é, o quanto é consumido de combustível para realizar determinado trabalho efetivo.

Vazão de ar

Unidades de condicionamento do ar de combustão são amplamente comercializadas por empresas especializadas. A classificação destas unidades depende dos limites de potência e associado consumo de ar dos motores. A Tabela 2.2 mostra a classificação das unidades de condicionamento do ar de admissão [1].

Tabela 2.2: Consumo de ar nos motores de combustão.

Modelo	Vazão máxima de ar	Potência do motor
Unidade 1	800 m ³ /h	diesel 140 kW, gasolina 200 kW
Unidade 2	1600 m ³ /h	diesel 280 kW, gasolina 400 kW

Fonte: Martyr & Plint [1]

A vazão do ar no interior do conduto de admissão possui uma energia cinética associada à sua velocidade. Esta energia contida no ar, se aproveita no tempo correto da abertura e fechamento das válvulas de admissão e exaustão. É criada, desta forma, uma sobre-alimentação devido à inércia do ar.

Heisler [11], a partir de testes experimentais, afirma que o valor mínimo na velocidade de admissão do ar é em torno de 14 m/s e a máxima em torno de 75 m/s. Altas velocidades na admissão podem causar uma diminuição da massa específica de ar com conseqüente diminuição da eficiência volumétrica.

A eficiência volumétrica, η_v , está diretamente relacionada com a capacidade que o motor possui para admitir uma determinada massa de ar. Pode-se dizer que η_v é a vazão mássica de ar no conduto de admissão pela taxa que o volume de ar é deslocado pelo pistão [12]. Para motores de 4 tempos a eficiência volumétrica é calculada pela Equação (2-12),

$$\eta_v = \frac{2 \cdot \dot{m}_a}{\rho_a \cdot V_d \cdot (n/60)} \quad (2-12)$$

onde n é a rotação do motor [rpm], \dot{m}_a é a vazão mássica de ar [kg/s], V_d é o volume deslocado total do motor [m³] e ρ_a é a massa específica do ar no coletor de admissão [kg/m³].

A potência do motor depende principalmente da quantidade de ar admitida pelo motor. Quando maior o volume de ar introduzido, maior será a quantidade de combustível que poderá injetar-se e, em conseqüência, a energia liberada e a potência gerada aumentam.

Para calcular a eficiência volumétrica, é necessário definir a massa específica do ar de admissão próximo à válvula de admissão. Quando \dot{m}_a

é determinada desta maneira, a eficiência volumétrica resultante mede a qualidade de bombeamento do cilindro e das válvulas.

Mas nem sempre é possível medir \dot{m}_a na janela da válvula de admissão. Entretanto, a massa específica pode ser medida na sala de testes, próximo da tomada de ar para o motor. Desse modo, obtém-se a massa específica do ar admitido. Com isso, a eficiência volumétrica resultante mede o desempenho do escoamento para todos os componentes do sistema de admissão. A eficiência volumétrica baseada neste método se chama eficiência volumétrica global [8].

$$\rho_a = \frac{p_a}{R \cdot T} \quad (2-13)$$

onde p_a é a pressão do ar admitido [kPa], T é a temperatura do ar [K] e R é a constante do ar igual a 0,287 kJ/kg-K.

Assim, a obtenção de uma eficiência volumétrica alta é um objetivo importante no desenvolvimento de motores de alto desempenho e projetos de sistemas de admissão de ar. O consumo de ar do motor é calculado como,

$$\dot{m}_a = \eta_v \cdot \frac{\rho_a \cdot V_d}{2} \cdot \frac{n}{60} \quad (2-14)$$

onde η_v varia entre 0,8 para motores normalmente aspirados e próximos de 1 para motores com turbo-compressor.

Pressão

Considerando constantes a temperatura e umidade atmosférica, o aumento da pressão barométrica faz aumentar a massa específica do ar, aumentando assim a massa de ar por unidade de tempo, fazendo com isso aumentar a quantidade de combustível injetado, proporcionando um crescimento da energia disponível e também da potência do motor [1]. Portanto, segue-se que uma mudança de 1% na pressão corresponde a uma mudança de 1% na massa de ar que entra no motor. Para a maioria dos dias do ano, ao nível do mar, a pressão atmosférica varia dentro dos limites de 100 kPa \pm 3%, que corresponde com uma variação percentual da massa de ar de 6%.

Variações na pressão do ar de admissão têm um importante efeito na auto-ignição (*knocking*), a pressão no cilindro no início da compressão em geral varia de acordo com a pressão do ar na admissão e a pressão no final da compressão muda na mesma proporção.

Temperatura

As variações na temperatura do ar têm um efeito da mesma ordem de magnitude que as variações na pressão barométrica dentro do intervalo esperado nas salas de ensaio de motores [1].

A massa específica do ar varia inversamente com a temperatura absoluta. No caso de um motor Diesel normalmente aspirado, com uma taxa de compressão de 16:1 e um suprimento de ar a 25°C, a temperatura da carga no início de compressão seria tipicamente 50°C. No final da compressão a temperatura pode ter valores na região dos 530°C, aumentando para cerca dos 560°C para uma temperatura de admissão do ar de 10°C mais elevados [1]. O nível desta temperatura pode ter um efeito significativo na formação de óxidos de nitrogênio na câmara de combustão, que é muito sensível ao valor máximo da temperatura de combustão.

Segundo Soares [9], a influência da temperatura do ar de admissão na potência do motor está diretamente relacionada à mistura ar-combustível. Para temperaturas mais elevadas, aumenta-se a tendência ao fenômeno de detonação e contribui-se a uma perda do rendimento volumétrico. Entretanto pode causar também diversas características como a evaporação estratificada de combustível líquido injetado na câmara. Em virtude da existência de vários componentes na sua formulação (como no caso dos derivados do petróleo), pode haver uma evaporação parcial a temperaturas diversificadas. Para baixas temperaturas, apenas uma parte muito pequena do combustível injetada será vaporizado, podendo ocasionar problemas de homogeneidade no escoamento da mistura ar-combustível.

Umidade

A umidade relativa do ar de admissão é um fator importante no desempenho do motor, porém não comparável à importância da influência da pressão e temperatura [9]. Segundo a NBR ISO 1585 [3] e Van Wylen et al. [13], o vapor de água presente no ar atmosférico exerce influência na pressão interna do cilindro, pois proporciona um acréscimo na pressão barométrica total. A essa influência é dada a denominação de pressão parcial do vapor de água. Assim, um aumento da umidade relativa do ar proporciona uma massa ar-combustível com mais partículas de água. Essas partículas de água se vaporizam, quando são submetidas a altas temperaturas no interior do cilindro, aumentando assim a pressão local [9].

O ponto importante a notar é que uma unidade de volume de ar úmido contém menos oxigênio disponível para a combustão do que o mesmo volume de ar seco nas mesmas condições de temperatura e pressão. Sendo o ar úmido uma mistura de ar e vapor de água, é o vapor que contém oxigênio em combinação química com hidrogênio e é portanto, não utilizável na combustão [9].

Devido a esses efeitos, mencionados linhas acima, a norma NBR ISO 1585 [3] especifica uma umidade relativa baixa de 30% a 25°C para realização de testes. Que corresponde a uma pressão de vapor de água de 1 kPa, o que implica uma pressão de ar seco de 99 kPa e uma correspondente redução no conteúdo de oxigênio de 1% quando comparado com o ar seco na mesma pressão.

O teor de umidade no ar de combustão tem também um efeito significativo sobre a formação de gases NO_x no escapamento de motores Diesel. O procedimento SAE para medição de emissões de escape dos motores Diesel dá uma expressão complexa como fator de correção, Martyn & Plint [1]. Isto indica que, se a medição de NO_x fosse feita com ar completamente seco, uma correção da ordem de +15% deve ser feita para dar o correspondente valor para um teste com teor de umidade de 60% de umidade relativa [1].

2.3.2

Condições-padrão de ensaio

Os métodos padrão para levar em conta os efeitos da condição do ar de admissão como previstos na normas brasileiras são utilizados principalmente para corrigir a potência do motor submetido a diferentes tipos de ensaios. Sendo que as condições do ar que entra no motor é uma função da pressão, temperatura e umidade, as condições-padrão de referência do ar de admissão, de acordo com a NBR ISO 1585 [3], são:

- Pressão = 100 kPa
- Temperatura = 25°C
- Umidade relativa = 30%

A Tabela 2.3 mostra os parâmetros de controle de um sistema comercial de condicionamento de ar de combustão para testes de motores.

Tabela 2.3: Características de operação de um condicionador de ar comercial.

Vazão de ar de admissão	máx.	2400	[m ³ /h]
	mín.	60	[m ³ /h]
Controle de pressão	máx.	$p_a + 100$	[mbar]
	mín.	$p_a - 100$	[mbar]
pressão máx. do ar ambiente	$p_{a,max}$	1020	[mbar]
pressão mín. do ar ambiente	$p_{a,min}$	920	[mbar]
Controle de temperatura	máx.	30	[°C]
	mín.	15	[°C]
temperatura máx. do ar ambiente	$T_{a,max}$	35	[°C]
temperatura mín. do ar ambiente	$T_{a,min}$	10	[°C]
Controle de umidade	máx.	20	[g H ₂ O/kg]
	mín.	8	[g H ₂ O/kg]
A mínima umidade do ar condicionado depende das condições do ar ambiente, da temperatura da água gelada e da pressão de saída do ar. Usando a máquina de condicionamento em condições-padrão, a umidade do ar condicionado pode ser ajustada entre 8 e 20 [g H ₂ O/kg].			
umidade máx. do ar ambiente	$\omega_{a,max}$	30	[g H ₂ O/kg]
umidade mín. do ar ambiente	$\omega_{a,min}$	3	[g H ₂ O/kg]

Fonte: AVL List GmbH [2]

2.4

Sistemas de controle para o condicionamento de ar

Segundo Miyagi [14], as principais funções de um sistema de condicionamento de ar são de resfriamento, aquecimento, umidificação e desumidificação. Considerando um sistema de controle de condicionamento do ar, pode-se adotar o modelo apresentado na Figura 2.2, para a classificação das partes do sistema.

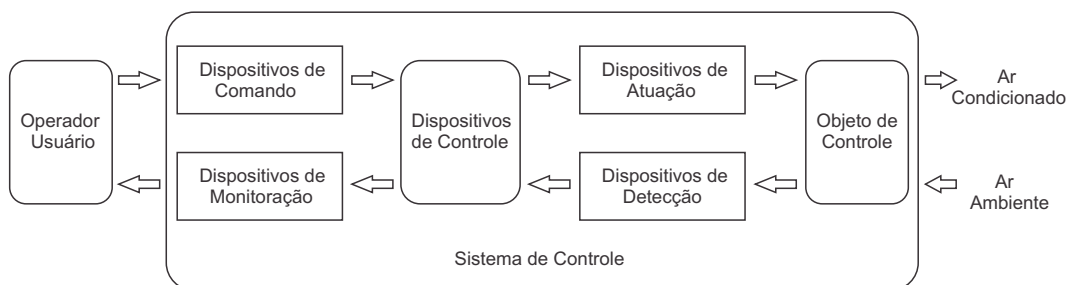


Figura 2.2: Sistema de controle para o condicionamento de ar.

Objeto de controle

Os objetos de controle, no caso do condicionamento do ar são; a vazão de água gelada ou quente, a potência das resistências elétricas de aquecimento, a vazão do vapor de umidificação, a vazão do ar condicionado do qual deseja-se controlar propriedades como a temperatura, umidade e pressão.

Dispositivos de atuação

Os dispositivos de atuação são responsáveis pela modificação do estado dos objetos de controle a partir dos sinais recebidos pelo controlador.

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

- *válvulas das serpentinas*: geralmente são do tipo de três vias e, através do desvio de parte da água quente ou fria fornecida às serpentinas, modifica-se a temperatura do ar que passa através das serpentinas;
- *válvulas de bloqueio*: são utilizadas para bloquear o fluxo através de chillers e aquecedores quando estes são desligados;
- *ventiladores*: são responsáveis pelo transporte do ar e pela regulação da pressão e vazão nos dutos;
- *dampers*: são registros que regulam a passagem do ar, são utilizados na caixa de mistura, onde são responsáveis pelo ajuste da proporção entre o ar exterior e o ar de retorno;
- *umidificadores*: aumentam a umidade do ar;
- *bombas*: são responsáveis pelo transporte da água gelada;
- *aquecedores*: realizam o aquecimento do ar nos dutos;
- *chillers*: são responsáveis pelo resfriamento de água, geralmente operam com um fluxo de água constante e fornecem água a uma temperatura constante pré determinada;
- *torres de resfriamento*: são responsáveis por liberar, para a atmosfera, o calor retirado pelo chiller.

Dispositivos de detecção

Os dispositivos responsáveis pela detecção do estado do sistema são os sensores e/ou transdutores. O sensor é o componente do sistema responsável pela realização das medições das variáveis de controle.

Os principais sensores utilizados no sistema de ar condicionado são:

- *sensores de temperatura*: podem ser utilizados para medir a temperatura do ar na saída do sistema de condicionamento, no fluxo de ar de retorno, no fluxo de ar de insuflamento, e a temperatura da água gelada de retorno do chiller;
- *sensores de umidade*: também chamados de higrômetros, são utilizados para medir a umidade do ar na saída do sistema de condicionamento;
- *sensores de pressão*: são utilizados para determinar a velocidade do ar e sua pressão;
- *sensores de fluxo*: são utilizados para a regulagem da velocidade dos ventiladores de retorno.

Dispositivos de comando

Nos sistemas de condicionamento de ar os dispositivos de comando geralmente se encontram espalhados nos diversos ambientes e variam de acordo com o tipo de sistema, englobando botões e chaves para a interface do usuário com o sistema condicionador.

Em sistemas automatizados, os equipamentos também podem ser comandados via interface com o computador, através de teclados, ou via aparelhos de telefone.

Dispositivos de monitoração

A monitoração das variáveis do processo de condicionamento de ar é realizada através de sinalizadores ou mostradores nos equipamentos e/ou na saída do sistema condicionador.

2.4.1

Classificação dos controladores

Os dispositivos de realização de controle, ou controladores, recebem os sinais dos dispositivos de detecção e dos dispositivos de comando (da parte dos usuários e operadores), comparam com o valor desejado, processam os dados, e enviam os sinais de saída para os dispositivos de atuação e de monitoração [15].

Nos sistemas de condicionamento de ar os controladores podem ser de diferentes tipos: eletro-mecânicos, digitais, analógicos, etc. Os sistemas com controladores programáveis, realizam o controle via software. Este tipo de controle também é chamado de controle digital direto (Direct Digital Control – DDC).

Segundo ASHRAE [15], o controlador digital recebe sinais eletrônicos dos dispositivos de comando e dos dispositivos de detecção, converte os sinais eletrônicos em variáveis digitais e realiza operações lógico-matemáticas no processador. A saída do computador é na forma de variáveis digitais que são convertidas para sinais adequados que operam os dispositivos de atuação e os dispositivos de monitoração.

Os controladores utilizados nos sistemas de condicionamento de ar são geralmente classificados segundo o tipo de ação corretiva gerada em resposta a uma alteração da variável de controle.

Controle ON-OFF

Neste tipo de sistema de controle o dispositivo de atuação pode assumir somente duas posições, ou seja, um estado máximo e outro mínimo, ou ligado e desligado.

Controle de passo (step control)

Estes controladores consistem em múltiplos dispositivos de duas posições que são acionados sucessivamente de acordo com a necessidade, na tentativa de se obter um efeito mais próximo a um controle proporcional.

Controle proporcional (P)

Neste caso o dispositivo de controle atua proporcionalmente ao erro que representa a diferença entre o valor desejado e o valor medido da variável de controle. Um controlador proporcional pode ser descrito pela Equação (2-15),

$$u = k_p \cdot e \quad (2-15)$$

onde u é o sinal de saída do controlador (sinal de controle), k_p é o ganho proporcional, e é o sinal de erro.

Controle proporcional-integral (PI)

Neste tipo de controle um novo termo relacionado à integral do erro é adicionado à expressão do controle proporcional visando obtenção de um erro em regime estacionário próximo a zero. O controle PI pode ser representado pela Equação (2-16),

$$u = k_p \cdot e + k_i \cdot \int e dt \quad (2-16)$$

onde k_i é o ganho integral e t representa o tempo.

Este novo termo introduzido faz com que quanto maior for o período durante o qual o erro existir, maior será o valor da saída do controlador na tentativa de eliminar o erro.

Controle proporcional-integral-derivativo (PID)

Neste tipo de controle uma nova parcela é adicionada ao controle PI. A finalidade deste termo derivativo é fornecer à ação de controle um caráter antecipatório decorrente da forma de variação do erro.

A expressão deste sistema é dada pela seguinte equação:

$$u = k_p \cdot e + k_i \cdot \int e dt + k_d \cdot \frac{de}{dt} \quad (2-17)$$

onde k_d é o ganho derivativo e de/dt é a derivada do erro em relação ao tempo.

No entanto, a adição do termo derivativo também faz com que o controlador seja sensível a ruídos, assim, a maioria das malhas de controle obtém, na prática, resultados mais satisfatórios com um controlador tipo PI.

Controle adaptativo

O controle adaptativo monitora as variáveis do sistema e busca a melhoria do desempenho através do ajuste dos parâmetros do controlador. O método utilizado para a modificação dos parâmetros varia de acordo com o algoritmo de controle e com o critério de otimização. Alguns critérios são a melhoria do tempo de resposta, a diminuição do consumo de energia, entre outros [15].

Técnicas de controle inteligente

Além das técnicas de controle tradicional apresentadas acima, os sistemas de condicionamento de ar também utilizam técnicas de controle derivadas de inteligência computacional (i.e., a Lógica Fuzzy), algoritmos genéticos, redes neurais, etc. São encontrados também exemplos de aplicação combinada destas técnicas [15].

2.5

Técnicas de inteligência computacional

2.5.1

Lógica fuzzy

O conceito “fuzzy” significa: difuso, incerto ou nebuloso. Parece implicar que a lógica fuzzy é uma metodologia imprecisa, que seria útil somente quando a precisão não é necessária ou importante. Contudo isso não é verdade, pois a lógica fuzzy pode solucionar problemas complexos com uma maior precisão e exatidão que as técnicas tradicionais. A Lógica Fuzzy foi desenvolvida por Lofti A. Sadeh^a, engenheiro e cientista de sistemas, durante a década de 1960. O artigo publicado pelo autor em 1965 pela Universidade da Califórnia, em Berkeley, revolucionou o assunto com a criação dos sistemas fuzzy (Santos [16]).

O período em que a Lógica Fuzzy despertou maior atenção está localizado entre os anos de 1986 e 1987, quando ocorreu a inauguração do sistema do Metrô de Sendai, em Tóquio, cujo controle automático de partida e chegada dos trens era baseado na lógica fuzzy, que nada mais é do que uma técnica utilizada para incorporar aos sistemas computacionais de controle as experiências heurísticas de um operador humano, ou seja, a forma humana de pensar, [16].

Devido a esta capacidade e à capacidade de realizar inferências, a lógica fuzzy tem encontrado grandes aplicações nas áreas de: controle de processos; robótica; processo de tomada de decisão; simuladores de voo; injeção eletrônica; ar condicionado; máquinas de lavar roupa; geladeiras; elevadores.

Em algumas dessas tarefas pode-se observar um alto índice de exigência na habilidade e na atenção por parte do operador, que é uma das principais características que o sistema deve apresentar para ter sucesso na implementação da lógica fuzzy, pois esta faz com que as decisões tomadas pelos computadores se aproximem cada vez mais das decisões humanas, principalmente ao trabalhar com uma grande variedade de informações, vagas e incertas [17].

Formalmente, um conjunto fuzzy A do universo de discurso U é definido por uma função de pertinência $\mu_A: U \rightarrow [0, 1]$, a qual é associada cada elemento x de U ao valor ou grau de pertinência $\mu_A(x)$ relativo à pertinência de x em A , segundo Zimmermann [18]. Portanto:

- $\mu_A(x) = 1 \Rightarrow x$ é totalmente compatível com A ;
- $\mu_A(x) = 0 \Rightarrow x$ é incompatível com A ;
- $0 < \mu_A(x) < 1 \Rightarrow x$ é parcialmente compatível com A , com grau $\mu_A(x)$.

^aZADEH, L. A. **Fuzzy Sets**, *Information and control*, vol. 8, p. 338-353, 1965.

Então, um conjunto A da teoria clássica de conjuntos pode ser entendido como um conjunto fuzzy particular, chamado de *crisp*, para o qual $\mu_A: U \rightarrow \{0; 1\}$, isto é, a pertinência é de tipo “tudo ou nada”, e não gradual.

Por outro lado a lógica fuzzy leva em conta a graduação que existe na natureza, ou seja, sem esquecer da possibilidade de existir uma pertinência gradual ou parcial.

Para modelar um sistema fuzzy que resolva um determinado problema, é preciso cumprir basicamente três etapas: fuzzificação, inferência e defuzzificação. Essas etapas serão detalhadas no decorrer desta seção, levando em conta que será utilizado o modelo de Mamdani [17]. Além do modelo clássico de Mamdani, existem outros modelos de sistemas fuzzy, dentre eles pode-se destacar, o modelo de Larsen, o modelo de Tsukamoto e o modelo de Takagi-Sugeno.

Uma estrutura determinística de um sistema fuzzy é mostrada na Figura 2.3. Diversas variações nessa estrutura básica são propostas na literatura, mas o modelo apresentado é genérico o suficiente para se ter uma idéia do fluxo da informação, Camargos [17]. A função de cada bloco é relatada a seguir:

- **Base de regras** – contém as estratégias de controle baseadas nas variáveis de entrada e saída, esse conjunto de instruções linguísticas são determinadas por especialistas na área da aplicação pretendida.
- **Fuzzificação** – converte as variáveis que caracterizam o estado do sistema do domínio real ou discreto para o domínio fuzzy.
- **Defuzzificação** – converte as ações de controle do domínio fuzzy para o domínio real ou discreto.
- **Sistema de inferência** – é a lógica de tomada de decisões, que juntamente com a base de regras permite gerar as ações de controle.

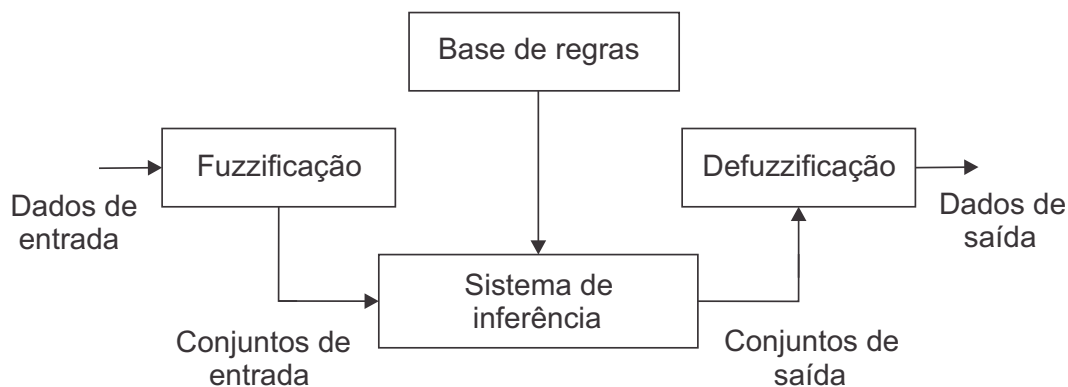


Figura 2.3: Configuração de um sistema fuzzy, mostrado por Zimmermann [18].

Fuzzificação

É o processo de mapeamento de uma determinada variável do domínio dos números reais para o domínio fuzzy. Cada variável de entrada recebe uma atribuição linguística qualitativa, definida por funções de pertinência do universo de discurso correspondente. Em seguida, a interface de fuzzificação utiliza funções de pertinência contidas na base de dados, associando a cada variável graus de pertinência relativos aos conjuntos fuzzy.

O processo de fuzzificação, então, pode ser entendido como um pré-processamento de categorias ou classes dos sinais de entrada.

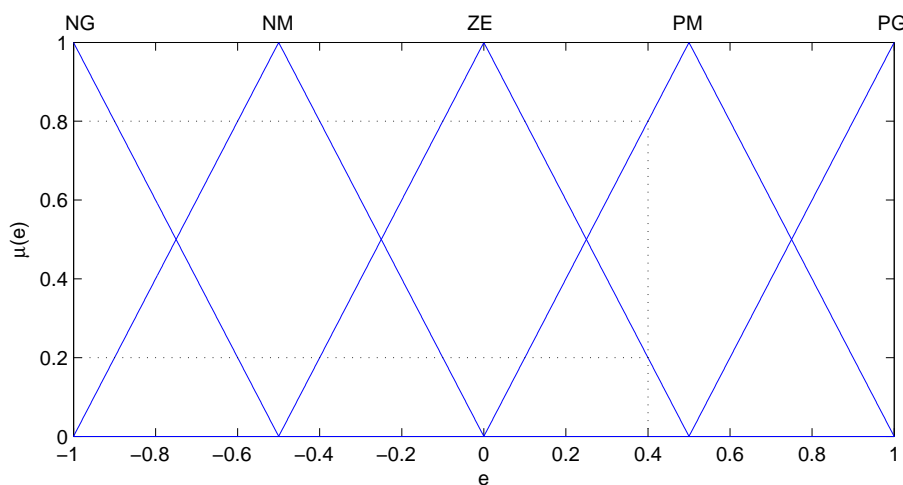


Figura 2.4: Exemplo de fuzzificação da variável erro (e).

Considere o universo de discurso mostrado na Figura 2.4, com 5 conjuntos fuzzy, para avaliar o sinal de erro de um determinado sistema de controle. Cada conjunto é nomeado com um termo linguístico apropriado:

- NG – Negativo Grande;
- NM – Negativo Médio;
- ZE – Zero;
- PM – Positivo Médio;
- PG – Positivo Grande.

Em um dado instante, uma entrada $e = 0,4$ está associada somente a dois conjuntos, ZE e PM, com graus de pertinência iguais a 0,2 e 0,8, respectivamente.

Inferência

O processo de inferência utiliza a base de regras segundo uma lógica de tomada de decisões para computar a ação de controle. A base de regras é um conjunto de informações sobre os valores linguísticos e funções de pertinência das variáveis de entrada e saída do sistema. É importante notar que a base de conhecimento (base de regras) é uma estratégia obtida produto da experiência dos operadores [19].

A lógica de tomada de decisões, incorporada à estrutura de inferência, utiliza implicações fuzzy para simular o raciocínio do operador e gerar a ação de controle conveniente, a partir de uma combinação de condições de entrada. A avaliação das regras por meio das implicações é resolvida por um processamento em paralelo, através de hardware, ou por processamento sequencial.

Existem dois tipos de regras de inferência fuzzy: o *modus ponens* generalizado (modo afirmativo) e o *modus tollens* (modo negativo).

O *modus ponens*, usado na lógica fuzzy, relaciona conjuntos fuzzy da seguinte forma:

$$\text{SE } x = A \text{ E } y = B \text{ ENTÃO } z = C$$

Um controlador fuzzy usa estas inferências as quais são ativadas em paralelo. Quando uma entrada é fornecida, o controlador dispara cada regra em paralelo com pesos diferentes, para inferir a saída.

A computação das regras SE-ENTÃO é realizada em duas etapas: 1) agregação, para computar a regra SE, que pode utilizar as *normas-t min* ou produto ou 2) combinação, para computar a regra ENTÃO, utiliza as *normas-s max*.

No entanto, dependendo do conectivo utilizado, pode-se usar uma norma ou outra, a saber:

$$\text{conectivo E:} \quad \mu(A \cap B) = \min[\mu(A), \mu(B)]$$

$$\text{conectivo OU:} \quad \mu(A \cup B) = \max[\mu(A), \mu(B)]$$

Por exemplo, em um controlador fuzzy, baseado em regras, o processo de inferência pode ser dividido nas três etapas seguintes:

- determinar o grau de pertinência global da premissa de cada regra;
- determinar a conclusão, para cada regra, em função do grau de pertinência e em função de seu peso;
- unir as contribuições das regras, a fim de determinar a ação de controle global.

Defuzzificação

Nesta etapa, o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras fuzzy é convertida em um valor numérico [19]. Quando é preciso apenas uma saída fuzzy a ser interpretada de modo qualitativo, a defuzzificação é desnecessária, mas na maioria dos casos precisa-se de um valor discreto utilizável como sinal de controle no mundo real; então a conversão do sinal de saída fuzzy para um valor *crisp* é o objetivo dessa etapa.

A defuzzificação consiste na aplicação dos valores obtidos na etapa de inferência em um dos métodos representados pela Equação (2-18) baseado no modelo discreto apresentado por Simões & Shaw [19], a Equação (2-19) conforme [19] e a Equação (2-20) de acordo com Pedrycz & Gomide [20].

- **Centro da Área (CoA)** – Também conhecido como centro de gravidade ou centróide, pois calcula o centro da área que representa o termo de saída fuzzy composto pela união de todas as regras. O cálculo do centróide no modelo discreto é determinado pela Equação (2-18),

$$X_{CoA} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i \cdot \bar{\mu}(x_i)}{\sum_{i=1}^m \bar{\mu}(x_i)} \quad (2-18)$$

onde m é o número de funções de pertinência, $\bar{\mu}(x_i)$ é a área da função de pertinência i modificada pelo resultado da inferência, e x_i é posição do centróide da função de pertinência i , X_{CoA} é o valor defuzzificado.

- **Centro dos Máximos (CoM)** – Apenas os picos das funções são utilizados, ignorando as áreas e considerando as contribuições de múltiplas regras, o que o torna bastante rápido computacionalmente. A defuzzificação é obtida pela média ponderada dos máximos,

$$X_{CoM} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i \cdot \mu(x_i)}{\sum_{i=1}^m \mu(x_i)} \quad (2-19)$$

onde $\mu(x_i)$ é o grau de pertinência de x_i . Neste caso, geralmente os conjuntos fuzzy da variável de saída são funções do tipo impulso unitário, porque, se fossem usadas funções com quaisquer outras formas, apenas seus pontos de máximo seriam armazenados e utilizados no processamento [19].

- **Média dos Máximos (MoM)** – No método MoM, após a inferência, o valor defuzzificado da saída é aquele cujo grau de pertinência é o maior. No caso de haver empate, ou quando a função de pertinência tem mais de um máximo, é realizada a média aritmética de todos máximos. O cálculo é realizado pela Equação (2-20),

$$X_{MoM} = \sum_{i=1}^m \frac{x_i}{m} \quad (2-20)$$

onde cada x_i é o i -ésimo elemento do universo de discurso, em que a função de pertinência tem valor máximo. O método MoM, ao contrário dos métodos CoA e CoM, é descontínuo, pois uma mudança muito pequena de uma variável de entrada pode causar uma alteração abrupta na variável de saída. Entretanto é importante ressaltar que um integrador colocado entre o controlador e o processo pode impedir que o sinal de controle dê grandes saltos [19].