

Aline Durrer Patelli Juliani
Pablo Andretta Jaskowiak
Diogo Lôndero da Silva

Laboratório de Refrigeração Veicular (LDRV), Universidade Federal de Santa Catarina, CEP 89221-703, Joinville-SC
E-mails: aline@ufsc.br, pablo.andretta@ufsc.br, diogo.londero@ufsc.br

Estratégias de Controle para Sistemas de Condicionamento de Ar Automotivo

Resumo: O sistema de condicionamento de ar automotivo tem como objetivo aumentar o conforto térmico e a segurança dos ocupantes de um veículo. Apesar destes benefícios, o sistema de condicionamento de ar é também responsável por um aumento significativo no consumo de combustível, o que reduz a eficiência energética do automóvel. Por este motivo, diferentes abordagens têm sido utilizadas pela indústria automotiva com o intuito de melhorar o desempenho energético de sistemas de condicionamento de ar. Dentre estas abordagens, verifica-se uma tendência crescente ao uso de estratégias de controle mais sofisticadas que o tradicional ciclo liga-desliga, no qual o sistema é ligado e desligado continuamente a fim de obter a temperatura desejada. A partir de uma revisão bibliográfica direcionada ao segmento automotivo, foram identificadas diferentes estratégias de controle empregadas na área, que podem ser classificadas nas seguintes categorias: (i) controle clássico, (ii) controle moderno e (iii) controle inteligente. A investigação realizada permitiu identificar as principais características das diferentes estratégias e suas limitações. Adicionalmente, observou-se que a utilização de estratégias sofisticadas de controle permite não apenas melhorar o conforto térmico dos ocupantes, mas também proporcionar reduções no consumo de energia superiores a 10%, quando comparadas a estratégias convencionais.

Palavras-chave: *Condicionamento de ar automotivo, estratégias de controle, eficiência energética.*

1. INTRODUÇÃO

O sistema de condicionamento de ar automotivo tem como principais finalidades proporcionar segurança e conforto térmico aos ocupantes do veículo. Apesar destes benefícios e da sua crescente utilização na indústria automotiva, este equipamento é também responsável por um aumento de até 10% no consumo de combustível (Farrington e Rugh, 2000). O consumo adicional observado se deve principalmente a energia necessária para o acionamento do compressor, bem como para movimentar a própria massa do sistema que é acrescentada à estrutura do veículo (IPCC, 2017).

Devido à legislação vigente e programas de eficiência energética que regulamentam a emissão de poluentes, estabelecendo referências para a eficiência energética de veículos, a indústria automotiva tem sido pressionada a melhorar o desempenho dos automóveis (Da Silva e Melo, 2016). Trabalhos recentes também evidenciam que a temperatura da cabine está entre os dez fatores mais relevantes associados a acidentes de trânsito (Farzaneh e Tootoonchi, 2008b). Uma vez que o sistema de condicionamento de ar automotivo é o maior subsistema em termos de consumo de energia do veículo, ele tem atraído a atenção do setor industrial e da comunidade acadêmica na busca de soluções (Zhang et al., 2016).

Dentre as diferentes abordagens identificadas na literatura para reduzir o consumo do sistema de condicionamento de ar, como por exemplo, o uso de trocadores de calor microcanais, compressores de deslocamento variável e ciclos de refrigeração alternativos, observa-se uma crescente tendência ao uso de estratégias de controle (Shah, 2009). Tais estratégias possuem uma ampla faixa de complexidade, que se inicia no controle convencional liga-desliga, no qual o sistema é simplesmente ligado e desligado continuamente para manter a temperatura do interior da cabine dentro de uma determinada faixa de temperaturas, até estratégias mais sofisticadas baseadas em inteligência artificial que podem atuar em um ou mais componentes do sistema de forma independente ou coordenada.

Tendo em vista estas tendências, o objetivo deste trabalho é identificar e analisar as principais estratégias de controle que podem ser empregadas para melhorar a eficiência energética e o conforto térmico associado a sistemas de condicionamento de ar automotivo. O restante do artigo está estruturado da seguinte forma. Na Seção 2 são apresentados os principais conceitos de sistemas de condicionamento de ar automotivos. A seguir são apresentadas as três principais formas de controle utilizadas na área, a saber, controle clássico (Seção 3), controle moderno (Seção 4) e controle inteligente (Seção 5), juntamente com a discussão de aplicações encontradas na literatura. Finalmente, na Seção 6, são apresentadas as considerações finais do trabalho, com perspectivas futuras de pesquisa que podem vir a ser exploradas.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR

Atualmente, existem basicamente duas configurações de sistemas de condicionamento de ar em uso pela indústria automobilística (Shah, 2009): (i) válvula de expansão termostática e tanque de líquido (VT-TL) e (ii) tubo de orifício e acumulador de líquido (TO-AL). Estas duas configurações são apresentadas na Fig. 1 e brevemente discutidas a seguir.

Na configuração VT-TL, Fig. 1(a), o ciclo inicia com a compressão do fluido refrigerante na fase vapor que sai do evaporador. Durante o processo de compressão, a temperatura do vapor é aumentada até um valor acima da temperatura do ambiente externo. Na sequência, o fluido refrigerante superaquecido que deixa o compressor escoar para o condensador onde transfere calor para o ambiente externo, mudando da fase vapor para a líquida. O fluido segue então para o tanque de líquido que permite apenas a passagem da fase líquida para a entrada da válvula de expansão termostática. Em seguida, o fluido é expandido na válvula termostática, que ajusta a vazão mássica de refrigerante de acordo com o superaquecimento medido na saída do evaporador. Ao final, o fluido que sai da válvula de expansão termostática escoar através do evaporador, onde troca calor com a corrente de ar externo, até que o estado termodinâmico inicial do ciclo seja restabelecido. Enquanto o ar escoar pelo lado externo do evaporador, a sua temperatura e a umidade são reduzidas. O ar frio e seco que sai do evaporador é então direcionado para o compartimento dos passageiros para controlar a temperatura interna do veículo.

Por sua vez, a configuração TO-AL emprega um tubo de orifício como dispositivo de expansão, como mostra a Fig. 1(b). Uma vez que o tubo de orifício impõe uma obstrução fixa ao escoamento, ele não permite o ajuste da vazão mássica de refrigerante em função da carga térmica no evaporador. Tal característica possibilita que o evaporador fique completamente cheio de líquido quando a carga térmica estiver abaixo da condição de operação nominal. Desta forma, para impedir a possibilidade de sucção de líquido pelo compressor, a configuração TO-AL exige a instalação de um acumulador na linha de sucção, entre a saída do evaporador e o compressor, como mostra a Fig. 1(b).

Destaca-se que a configuração VT-TL apresenta um melhor desempenho energético do que a TO-AL. Esta diferença de desempenho deve-se a dois fatores: (i) a capacidade da válvula termostática para ajustar a vazão de refrigerante ao evaporador em função da carga térmica e (ii) o aumento da queda de pressão na entrada do compressor provocado pelo acumulador, que por sua vez reduz a eficiência volumétrica do processo de compressão. Apesar de suas desvantagens relacionadas à eficiência energética, observa-se que o conceito TO-AL é amplamente utilizado devido ao seu baixo custo em relação ao VT-TL (Shah, 2009).

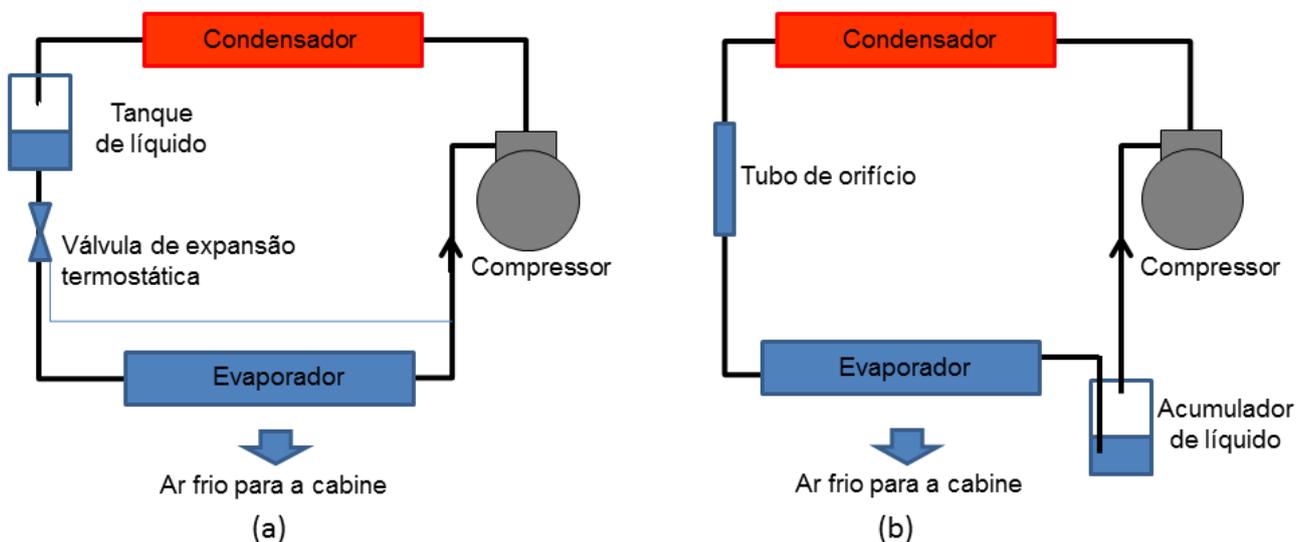


Figura 1. Configurações (a) Válvula de expansão termostática e tanque de líquido (VT-TL) e (b) Tubo de orifício e acumulador de líquido (TO-AL) empregados pela indústria automotiva.

3. CONTROLE CLÁSSICO

O controle clássico é aplicado em sistemas lineares, invariantes no tempo, com uma entrada e uma saída (SISO, *Single-Input, Single-Output*), (Ogata, 2011). Em um sistema de condicionamento de ar automotivo que utiliza este tipo de controle, uma única variável é usualmente selecionada para ser controlada, sendo esta geralmente a temperatura da cabine ou do superaquecimento no evaporador.

Independentemente do tipo de compressor utilizado no veículo, o controle mais utilizado é o liga-desliga, devido a sua simplicidade e ao baixo custo. O seu funcionamento baseia-se na comparação da temperatura da cabine com a desejada (referência), cuja diferença é o erro. Este erro é corrigido constantemente pelo controlador, que emite um sinal de controle que determina se o compressor deve permanecer ligado ou desligado. Por exemplo, caso a temperatura esteja acima da referência, o compressor é acionado, caso contrário o compressor é desligado. Na maioria dos sistemas automotivos, o acionamento do compressor é realizado por uma embreagem eletromagnética conectada a polias que são tracionadas pelo motor do veículo, ou seja, a velocidade do compressor é proporcional à do motor do veículo.

O controle liga-desliga é muito limitado, pois é do tipo SISO, mas, sobretudo, por desprezar perturbações importantes do sistema de refrigeração, como a temperatura ambiente, umidade relativa, velocidade do ar e ocupação do veículo. Para melhorar tais características, ainda dentro do controle clássico, é possível utilizar as ações de controles proporcionais, integrais e derivativas. O controlador proporcional (P) é utilizado para corrigir um erro, no tempo atual. Já controladores proporcionais e integrais (PI) atuam no erro em regime permanente, considerando erros remanescentes. Finalmente, os controladores PID atuam em regimes transitório e permanente, pois também consideram a previsão do erro. No sistema de condicionamento de ar automotivo, a válvula de expansão termostática é um exemplo de controlador pneumático proporcional (Stoecker, 1998), sendo o seu ganho ajustado pela variação da tensão da mola (Wang, 2000), para determinar a vazão de refrigerante. Por sua vez, os controladores PID são mais apropriados para controlar o fluxo de ar nos trocadores de calor (Wang, 2000).

A abordagem clássica de controle, desenvolvida nas décadas de 40 e 50, baseia-se nos métodos de resposta em frequência e lugar das raízes, consistindo em sistemas estáveis que satisfazem determinados requisitos de desempenho. No entanto, esses sistemas, geralmente aceitáveis, não são ótimos e tratam de uma única entrada e saída (Ogata, 2011). Tais limitações levaram ao desenvolvimento das teorias de controle moderno que são apresentadas na próxima seção.

4. CONTROLE MODERNO

A partir de 1960, com o avanço dos computadores, análises de sistemas com um grande número de equações, múltiplas entradas e saídas (MIMO, *Multiple-Input, Multiple-Output*) foram viabilizadas. Esses estudos são realizados diretamente no domínio do tempo, com o emprego das variáveis de estado (Ogata, 2011). Essa metodologia descreve o comportamento futuro de um sistema, através das equações dinâmicas, a partir de um estado presente e da entrada.

Na configuração do controle moderno, mostrada na Fig. 2, todas as variáveis de estado são realimentadas após uma adequada ponderação. O sinal de controle $u(t)$ é determinado pelo controlador baseado no estado do sistema $x(t)$ e na entrada $r(t)$, (Naidu, 2002).

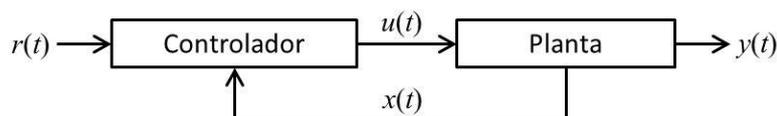


Figura 2. Configuração do controle moderno (Naidu, 2002).

Entre as décadas de 60 e 80, foram desenvolvidos o controle ótimo e adaptativo. Após esse período, as pesquisas e teorias estão voltadas para a área de controle robusto, H_∞ e assuntos relacionados a esses tópicos (Ogata, 2011). O controle adaptativo surgiu para suprir as necessidades de sistemas que operam em condições com diversas mudanças. Todas as técnicas adaptativas podem ser utilizadas para o ajuste automático dos controladores, de maneira fixa ou contínua (Aström; Wittenmark, 1995). O controle ótimo tem o objetivo de determinar sinais de controle que atuem na planta, satisfazendo algumas condições de contorno, e ao mesmo tempo maximizando ou minimizando um critério de desempenho (função custo ou índice de desempenho). As técnicas de otimização utilizadas consistem em programação dinâmica, cálculo variacional e princípio de Pontryagin. No caso do índice de desempenho ser quadrático, o método do regulador quadrático ótimo (LQR, *Linear Quadratic Regulator*) é utilizado, não sendo considerado apropriado para sistemas com distúrbios externos e incertezas na modelagem dinâmica (Naidu, 2002).

Para suprir as inadequações citadas no parágrafo anterior, a área de controle robusto tem sido amplamente estudada, possuindo o enfoque em atingir determinados requisitos de desempenho, mantendo-se a estabilidade interna. Um modo de descrever as especificações de desempenho é em termos do tamanho dos sinais de interesse, dependendo do projeto, são utilizadas as normas H_2 e H_∞ (Zhou e Doyle, 1998).

Sistemas de controle que são expressos por uma função de estado descontínua são nomeados de modos deslizantes (SMC, *Sliding Mode Control*). São empregados em plantas que possuem a dinâmica não linear, ordem elevada e operam em condições incertas (Utkin, 1999).

Os métodos de controle utilizados em sistemas de condicionamento de ar, especificamente em residências e indústrias, possuem o enfoque na temperatura ambiente, considerando-se desprezíveis as oscilações transitórias da pressão do refrigerante no evaporador e condensador. Já em aplicações automotivas, essa característica é bem diferente, pois o ciclo de trabalho do compressor é curto, causando rápidas variações de pressão no sistema. Além desse aspecto, possuem a dinâmica não linear e estão sujeitos a diversos distúrbios, como temperatura externa do veículo, radiação solar, número de passageiros e umidade. Baseado nessas descrições, métodos de controle moderno estão sendo amplamente aplicados em condicionamento de ar automotivo, principalmente para atender a necessidade da redução do consumo energético (Zhang et al., 2016).

O projeto do condicionador de ar automotivo deve considerar as seguintes restrições: manter a pressão do evaporador em um determinado valor que evite a formação de geada e controlar a temperatura do superaquecimento para evitar o retorno de líquido para o compressor. Os distúrbios, causados pela variação das taxas de fluxo e temperatura do ar no evaporador e condensador, também devem ser consideradas a fim de trazer robustez para o sistema (Zhang e Canova, 2015).

Com o intuito de atender esses requisitos, o controle robusto H_∞ foi proposto e simulado por (Zhang e Canova, 2015). Os erros da temperatura do superaquecimento e da diferença de pressão entre o evaporador e condensador são corrigidos. Os distúrbios causados pela variação do fluxo de massa do ar e os ruídos oriundos dos sinais das medições também foram inseridos na modelagem.

Zhang et al. (2016) propõe a otimização de três fatores: o consumo de combustível, o conforto térmico da cabine (requisito expresso como pressão do evaporador) e a durabilidade da embreagem eletromagnética do compressor. Este último é considerado por meio de uma função adicional de custo, para prevenir o chaveamento da embreagem em alta frequência. Para a obtenção dos pesos, de cada função objetivo, foi utilizada uma combinação da programação dinâmica com a análise de Pareto. A partir dessas definições, foi adotado um método híbrido de controle, unificando os conceitos ótimos, em tempo contínuo, para sistemas chaveados, que foi solucionado aplicando-se o princípio de Pontryagin. Os resultados (obtidos a partir de simulações) mostraram que a duração ótima do ciclo de trabalho não é afetada pela forma de condução do veículo, mas sim, pelas características do sistema de condicionamento de ar.

Na maioria dos veículos comercializados atualmente, a velocidade do compressor é proporcional à do motor de tração. Esse tipo de configuração dificulta o desenvolvimento de controladores mais sofisticados. O surgimento dos veículos híbridos e elétricos viabilizou a independência do sistema de condicionamento de ar e avanços na área de controle (Huang et al., 2016). A aplicação, no sistema de condicionamento de ar, de um compressor com velocidade variável, possibilitou o uso do controle preditivo baseado em modelos (MPC, *Model Predictive Control*), (Huang et al., 2016). Esse conceito tem as raízes no controle ótimo e utiliza o modelo dinâmico da planta para estimar o comportamento futuro, baseado nos dados medidos no passado (Rawlings e Mayne, 2015).

O uso de um modelo não linear, extremamente complexo, para o desenvolvimento do controlador, torna a eficiência computacional muito baixa, por isso, Huang et al. (2016) propõe a linearização e a discretização do MPC. Nesse equacionamento, a temperatura na entrada do condensador é considerada igual a ambiente, a temperatura da carroceria/cabine é a saída, enquanto a velocidade do compressor e as frequências dos acionamentos dos ventiladores do condensador e evaporador são as entradas. Esse modelo é composto por seis estados: pressão do evaporador e condensador, tamanhos da seção bifásica nos trocadores de calor, temperatura da cabine e temperaturas equivalentes entre a parede do tubo e aleta dos dois trocadores. Após essa etapa de linearização e discretização, a otimização do horizonte finito (com a função objetivo focada nos esforços do controle) é formulada para cada intervalo de tempo e é transformada em um problema quadrático. Esse modelo foi validado experimentalmente em um sistema de condicionamento de ar/refrigeração aplicado a caminhões. Com relação aos controladores, foram implementados no SIMULINK/MATLAB e LABVIEW, consistiram em 5 tipos: liga-desliga, MPC discreto, MPC contínuo, híbrido direto (quando a carga térmica fosse maior do que 0,5 kW, o MPC discreto seria ativado, caso contrário, funcionaria o liga-desliga) e híbrido adaptativo (iniciaria o funcionamento com o MPC discreto e quando a carga térmica fosse menor do que 0,5 kW, assumiria o liga-desliga, sendo a velocidade do ventilador do evaporador atualizada). Comparando-se o controle MPC discreto com o liga-desliga, o primeiro obteve menor consumo e melhor comportamento de temperatura em relação ao segundo, nas condições testadas. O MPC mostrou-se robusto para distúrbios externos e para a condição de formação de geada. Os melhores resultados observados sugerem uma redução de consumo de 23% no caso do MPC contínuo e 15% no caso do controle híbrido direto quando comparados ao controle liga-desliga.

Com o intuito de projetar um sistema de controle robusto, com pouco esforço computacional, que geralmente não ocorre com o MPC, Huang et al. (2017) utilizou a mesma modelagem do sistema de condicionamento de ar/refrigeração desenvolvido em Huang et al. (2016), aplicando dois controladores simultaneamente: o SMC para corrigir o erro da temperatura da cabine e PI para atuar no erro da pressão de condensação (foi encontrada uma função convexa que faz a correlação das pressões de condensação e evaporação, visando o consumo mínimo em regime permanente). A velocidade do compressor pode assumir três valores diferentes, sendo alterada de acordo com uma lógica associada ao erro da temperatura da carroceria/cabine. Ensaios experimentais foram feitos com a metodologia

proposta e comparados com o controle liga-desliga, sendo que o primeiro apresentou uma redução na variabilidade da temperatura da carroceria/cabine e uma redução média no consumo em 9%.

5. CONTROLE INTELIGENTE

O crescente interesse e desenvolvimento na área de controle inteligente (CI) se deve, em grande parte, a necessidade da redução do consumo energético e ao aumento da complexidade dos sistemas que devem ser controlados, principalmente no caso de sistemas inerentemente não lineares. Do ponto de vista do controle tradicional, deve-se construir um modelo matemático que descreve o sistema, suas interações e dinâmicas. Além disso, durante a modelagem matemática do sistema torna-se necessário antecipar possíveis incertezas nas medições (provenientes, por exemplo, de diferentes tipos de transdutores) e variações no próprio ambiente de operação, as quais, na prática, são difíceis de prever. Estes aspectos possuem impacto na robustez final do modelo, determinando se representa de maneira satisfatória, ou não, as condições mais adversas na qual o sistema deverá operar posteriormente. Mesmo considerando todos estes aspectos, o modelo obtido ao final do processo pode, porém, não ser adequado para obtenção de algoritmos de controle, dada sua elevada complexidade (Saddique, 2014).

A área de CI surgiu em meados da década de 70, com a introdução de métodos ou técnicas provenientes do campo de inteligência artificial (IA) em sistemas nos quais o controle era realizado computacionalmente e, desde então, tem recebido crescente atenção da comunidade científica e da indústria (Zilouchian e Jamshidi, 2000). Muito embora tenha havido certa discussão no passado acerca da própria definição do termo controle inteligente (Antsaklis, 1994), tendo em vista a dificuldade em definir precisamente o significado do termo inteligência, a área tem se caracterizado por englobar diferentes formas de controle que não se enquadram no chamado controle tradicional (Antsaklis, 1999), abordado nas seções anteriores. Por esta razão, o CI é, naturalmente, um campo interdisciplinar que compreende métodos e teorias de áreas como ciência da computação, inteligência artificial, aprendizado de máquina, e da própria teoria de controle, dentre outras (Antsaklis, 1999; Saddique, 2014).

Uma característica do CI é a ausência de um modelo matemático explícito, geralmente obtido através de princípios físicos, que descreve o comportamento do sistema a ser controlado. O controle é feito através de técnicas de uso geral, provenientes de diversas áreas, que são aplicadas para um problema específico. Muitas das técnicas empregadas possuem em comum o fato de buscar uma resolução para o problema com inspiração na cognição humana, isto é, buscam imitar, ainda que de forma rudimentar, aspectos fundamentais do comportamento humano como aprendizado, adaptação e raciocínio em condições incertas ou mal definidas. Dada a natureza geral das técnicas, modelos de CI são usualmente vistos em função do seu comportamento em relação à pares de entrada e saída (Saddique, 2014) possuindo, geralmente, uma elevada robustez à presença de altos graus de incerteza ou variações no sistema (Bavarian, 1988). Dentre as técnicas comumente empregadas no CI estão redes neurais artificiais (RNAs), lógica fuzzy, algoritmos genéticos (AGs), aprendizado por reforço, sistemas especialistas, dentre outras (Antsaklis, 1999; Zilouchian, A.; Jamshidi, M, 2000; Szederkényi et al. 2001; Saddique, 2014). Em sistemas de condicionamento de ar automotivo, merecem destaque métodos baseados em RNAs e lógica fuzzy, por sua utilização na literatura. Estas abordagens são brevemente discutidas a seguir.

Redes neurais artificiais (RNAs) são modelos matemáticos simplificados que buscam mimetizar sistemas neurais biológicos e, conseqüentemente seu bom desempenho na resolução de tarefas inerentemente não lineares e suscetíveis à presença de ruído (Haykin, 2007). As RNAs são construídas com base em neurônios artificiais, unidades simples e não lineares de processamento, que são conectados por sinapses, as quais, em última análise, são pesos entre sinais propagados de um neurônio a outro. Existem diversas arquiteturas de RNAs na literatura, como por exemplo às redes de múltiplas camadas, totalmente conectadas de propagação à frente (Fig. 3) usualmente empregadas na área de controle (Zilouchian e Jamshidi, 2000). Uma característica fundamental destes modelos é sua capacidade de aprender a partir de pares de entrada e saída desejada, através de algoritmos como, por exemplo, *Backpropagation* (Haykin, 2007). Destaca-se que quanto maior for a quantidade de pares de entrada e saída desejada disponíveis para o treinamento, maior a chance de sucesso do modelo obtido. Uma vez que a rede é treinada pode então ser submetida a entradas não vistas durante o treinamento, a fim de tomar decisões por conta própria. As entradas e saídas podem ser as mais diversas possíveis, como, por exemplo, a temperatura interna da cabine de um veículo, a temperatura do evaporador, rotação do compressor, dentre outras.

É importante notar que RNAs são modelos de uso geral, não sendo necessário por parte do projetista um conhecimento profundo das características do sistema para sua modelagem, visto que um modelo não explícito de resolução do problema é derivado do processo de aprendizado, isto é, a rede e seus pesos ajustados.

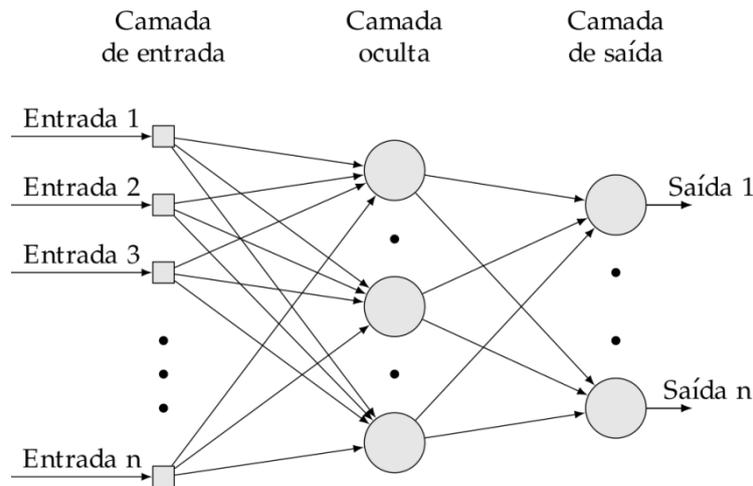


Figura 3. Esquema geral de uma rede neural artificial de múltiplas camadas totalmente conectada.

A lógica fuzzy foi introduzida por Zadeh (1965) e permite uma representação mais natural de conceitos imprecisos que são usualmente utilizados na linguagem cotidiana (Zilouchian e Jamshidi, 2000). Uma pessoa, por exemplo, seria capaz de afirmar se sente frio ou calor em uma dada condição, mas dificilmente conseguiria definir a temperatura exata de transição. Com o uso da lógica fuzzy, conceitos imprecisos como este são expressos por funções de pertinência, às quais um valor observado pertence com maior ou menor grau. A combinação destes conceitos com um conjunto de regras na forma *se condição então ação* e um motor de inferência permitem que a partir de definições e observações imprecisas sejam obtidos resultados bem definidos de uma maneira objetiva, obedecendo a formalismos matemáticos. O conhecimento de um especialista, neste tipo de sistema, é mais necessário que em sistemas neurais, dado que seu funcionamento depende, em grande parte, da definição de regras razoáveis para a determinação de suas ações.

A seguir são apresentados trabalhos da literatura que empregam abordagens baseadas em CI em sistemas de condicionamento de ar automotivos. Do ponto de vista do controle, as principais diferenças dos trabalhos são observadas em relação às próprias técnicas utilizadas, as entradas disponíveis ou utilizadas pelos sistemas (usualmente obtidas através de sensores) e as variáveis de fato controladas. É interessante notar que os componentes dos sistemas controlados variam de acordo com a publicação (por exemplo, modelo de compressor e válvula). Embora a maioria dos artigos busque uma redução no consumo do sistema de condicionamento de ar, alguns possuem um enfoque diferenciado, avaliando principalmente aspectos relacionados ao conforto térmico dos passageiros. Finalmente, são observadas diferenças consideráveis na forma de avaliação realizada para validar ou comparar os sistemas de controle inteligente desenvolvidos, que envolvem basicamente experimentos físicos ou simulações computacionais, com variados graus de fidelidade.

O trabalho de Xuquan et al. (2004) aborda o controle de válvulas de expansão eletrônicas (VEE). Seu controle possui o objetivo de melhorar o desempenho térmico do evaporador, como discutido na Seção 2. No sistema considerado pelos autores, em que o compressor possui rotação determinada pelo motor do veículo, o controle da válvula de expansão é crucial, pois o fluxo de fluido refrigerante não é constante. Os autores argumentam que em vista das variadas condições de operação do sistema, neste caso, controladores PID não apresentam desempenho satisfatório e propõe uma abordagem híbrida, na qual um sistema fuzzy é utilizado para ajustar os parâmetros do controlador PID em tempo real (*online*). A abordagem introduzida pelos autores é denominada FSPID (Fuzzy Self-tuning PID). O sistema fuzzy recebe como entradas o erro de superaquecimento no evaporador e a taxa de mudança do erro, com base nestes valores, fornece os ajustes necessários aos ganhos proporcional, integral e derivativo. O controlador PID utiliza o erro da temperatura de superaquecimento no evaporador para determinar o sinal de controle, que por sua vez, define a abertura da EEV. Os autores realizaram testes experimentais com o sistema de condicionamento de ar de um veículo VW Passat B5 e compararam o resultado de sua abordagem (FSPID) a um controlador PID tradicional, observando uma redução de aproximadamente 3 graus Celsius na temperatura do ar que sai do evaporador e entra na cabine.

Razi et al. (2006) apresenta uma abordagem de controle de temperatura baseada em uma RNA RBF (*radial basis function*), considerando um compressor de rotação variável. A RNA recebe como entrada os valores atuais de velocidade do compressor, temperatura do ar e diferenças entre a temperatura de saída do sistema e a temperatura desejada (referência) nos tempos atual, e nos dois instantes de tempo exatamente anteriores. A saída preditiva da RNA consiste da mudança de temperatura esperada no próximo instante. Com base neste resultado um sistema de otimização busca minimizar tal diferença, ajustando a rotação do compressor. São realizados experimentos, com um modelo

simulação transiente (validado contra dados experimentais), que leva em conta cargas térmica do ambiente, do veículo e dos ocupantes. Os resultados obtidos sugerem que a abordagem proposta aproxima melhor a temperatura de referência, quando comparada a um controlador fuzzy PID, porém a um maior custo computacional.

Farzaneh e Tootoonchi (2008a,b) desenvolvem dois controladores Fuzzy, que são posteriormente comparados, a fim de maximizar conforto térmico dos passageiros. O primeiro é baseado somente na temperatura interna observada no veículo, enquanto o segundo utiliza como entrada valores do modelo PMV (*Predicted Mean Vote*) de Fanger, que descreve conforto com base em seis diferentes variáveis (Farzaneh et al. 2008b). Em ambos os casos a potência do ventilador e a mistura do ar que entra na cabine são controlados. Com base em simulações, os autores demonstram que o controlador baseado em valores de PMV resulta em um maior conforto térmico e COP (embora este não seja o principal objetivo do trabalho). Em experimentos adicionais, as funções de pertinência do controlador baseado em valores PMV são otimizadas através de um algoritmo genético (de forma *offline*), melhorando os resultados de conforto. Simulações com diferentes cargas térmicas são realizadas pelos autores, demonstrando a robustez e rápida adaptação do controlador.

O trabalho de Khayyam et al. (2011a) tem como objetivo a redução de consumo observado no sistema de condicionamento de ar, mas se preocupa também com aspectos de conforto térmico. Os autores apresentam uma estratégia de controle coordenada que atua na potência dos ventiladores, temperatura do evaporador e mistura de ar que entra na cabine. A unidade de controle recebe como entrada dados de transdutores de temperatura, umidade e nível de CO₂. Os autores desenvolvem um sistema multi controle, que emprega um controlador PID (em conjunto com outros três controladores mais simples) com parâmetros ajustados em tempo real por uma RNA, que recebe como entrada temperatura desejada e atual. O controlador proposto se mostrou robusto em simulações considerando diferentes condições externas, proporcionando até 14% de redução de consumo. Esta estratégia foi posteriormente utilizada como base de comparação por Khayyam et al. (2011b), que integram ao sistema informações de GPS e inclinação da via a fim de determinar qual a potência requerida por parte do motor no futuro próximo. Estas informações são então integradas ao sistema de controle, proporcionando uma redução superior à observada no trabalho de Khayyam et al. (2011a) em termos de consumo.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma revisão das principais estratégias de controle utilizadas em sistemas de condicionamento de ar automotivo que tem como principais objetivos a redução do consumo de combustível e o aumento do conforto térmico dos ocupantes. Foram identificadas diferentes estratégias de controle empregadas na área automotiva, as quais podem ser classificadas nas seguintes categorias: controle clássico, controle moderno e controle inteligente.

Os estudos analisados evidenciaram que o controle clássico trata de sistemas SISO, não ótimos, sendo empregado em sistemas de condicionamento de ar pela sua simplicidade. No entanto, devido à existência de múltiplas entradas e saídas com relações não lineares entre si e a sua susceptibilidade a distúrbios externos, técnicas de controle moderno vem sendo amplamente utilizadas. As melhorias obtidas em relação à eficiência energética são evidenciadas em estudos que aplicam o controle robusto em sistemas que utilizam compressores com velocidade variável. Dependendo da complexidade do controle utilizado, reduções de potência de 9 e 23% foram obtidas em relação ao controle liga-desliga.

No caso do controle inteligente as abordagens são predominantemente construídas com o uso de redes neurais artificiais e lógica fuzzy. Destacam-se ainda sistemas híbridos, baseados em combinações de técnicas do controle tradicional que tem seus parâmetros ajustados de forma *online* com o uso de técnicas inteligentes.

7. REFERÊNCIAS

- ANTSAKLIS, P. J. Intelligent Control. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, Vol. 10, p. 493-503, 1999.
- ANTSAKLIS, P. J. On Intelligent Control: Report of the IEEE CSS Task Force on Intelligent Control. Technical Report of the ISIS (Interdisciplinary Studies of Intelligent Systems) Group, No. ISIS-94-001, University of Notre Dame, Janeiro, 1994.
- ASTRÖM, K. J.; WITTENMARK, B. A survey of adaptive control applications. IEEE Conference on decision and control, Vol. 1, p. 649-654, 1995.
- BAVARIAN, B. (1988). Introduction to neural networks for intelligent control. IEEE Control Systems Magazine, Vol. 8, Issue 2, p. 3-7, 1988.
- DAVIS, L. I.; SIEJA, T. F.; MATTESON, R. W.; DAGE, G. A.; AMES, R. Fuzzy logic for vehicle climate control. Proceedings of 1994 IEEE 3rd International Fuzzy Systems Conference, Orlando, Vol.1, p. 530-534, 1994.

- DA SILVA, D.L., MELO, C., A perspective on R&D&I activities in the Brazilian mobile air conditioning market. 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Vitoria, ES, Brazil, 2016.
- FARRINGTON, R.; RUGH, J., Impact of Vehicle Air-Conditioning on Fuel Economy, Tailpipe Emissions, and Electric Vehicle Range, National Renewable Energy Laboratory, 2000.
- FARZANEH, Y.; TOOTOONCHI, A. A. Intelligent control of thermal comfort in automobile. IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, Chengdu, p. 510-514, 2008a.
- FARZANEH, Y.; TOOTOONCHI, A. A. Controlling automobile thermal comfort using optimized fuzzy controller. Applied Thermal Engineering, Vol. 28, Issue 14, p. 1906-1917, ISSN 1359-4311, 2008b.
- HAYKIN, S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation (3rd Edition). Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 2007.
- HUANG, Y.; KHAJEPOUR, A.; BAGHERI, F.; BAHRAMI, M. Optimal energy-efficient predictive controllers in automotive air-conditioning/refrigeration systems. Applied Energy, Vol. 184, p. 605-618, 2016.
- HUANG, Y.; KHAJEPOUR, A.; BAGHERI, F.; BAHRAMI, M. An energy-saving set-point optimizer with a sliding mode controller for automotive air-conditioning/refrigeration systems. Applied Energy, Vol. 188, p. 576-585, 2017.
- IPCC, 2017, Intergovernmental Panel on Climate Change, Disponível em: < www.ipcc.ch.>, Acesso em: 30 jun. 2017.
- KHAYYAM, H.; KOUZANI, A. Z., HU, E. J.; NAHAVANDI, S. Coordinated energy management of vehicle air conditioning system. Applied Thermal Engineering, Vol. 31, Issue 5, p. 750-764, ISSN 1359-4311, 2011a.
- KHAYYAM, H.; NAHAVANDI, S.; HU, E.; KOUZANI, A.; CHONKA, A.; ABAWAJY, J.; MARANO, V.; DAVIS, S. Intelligent energy management control of vehicle air conditioning via look-ahead system. Applied Thermal Engineering, Vol. 31, Issue 16, p. 3147-3160, ISSN 1359-4311, 2011b.
- KHAYYAM H.; ABAWAJY, J.; JAZAR, R. N. Intelligent energy management control of vehicle air conditioning system coupled with engine, Applied Thermal Engineering, Vol. 48, p. 211-224, ISSN 1359-4311, 2012.
- NAIDU, D. S. Optimal Control Systems. New York: CRC Press, 2002.
- OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. São Paulo: Pearson, 2011.
- RAZI, M.; FARROKHI, M.; SAEIDI, M. H.; KHORASANI, A. R. F., Neuro-Predictive Control for Automotive Air Conditioning System. IEEE International Conference on Engineering of Intelligent Systems, Islamabad, p. 1-6, 2006.
- RAWLINGS, J. B.; MAYNE, D. Q. Model Predictive Control: Theory and Design. Madison: Nob Hill Publishing, 2015.
- SADDIQUE, N. Intelligent Control: A Hybrid Approach Based on Fuzzy Logic, Neural Networks and Genetic Algorithms. 1ª Edição. Switzerland: Springer International Publishing, vol. 517, p. 282, 2014.
- SHAH, R. K. Automotive Air-Conditioning Systems - Historical Developments, the State of Technology, and Future Trends. Heat Transfer Engineering, Vol. 30, No. 9, p. 720-735, 2009.
- STOECKER, W. F. Industrial Refrigeration of Handbook. New York: McGraw-Hill, 1998.
- SZEDERKÉNYI, G.; LAKNER R.; GERZSON, M. Intelligent Control Systems: An Introduction with Examples (Applied Optimization). Florida: Springer, Vol. 60, p. 306, 2001.
- UTKIN, V.; GULDNER, J.; SHI, J. Sliding Mode Control in Electromechanical Systems. London: Taylor & Francis, 1999.
- XUQUAN, L.; CHEN, J.; CHEN, Z., LIU, W., HU, W., LIU, W., A new method for controlling refrigerant flow in automobile air conditioning. Applied Thermal Engineering, Vol. 24, Issue 7, p. 1073-1085, ISSN 1359-4311, 2004.
- ZADEH, L.A.; Fuzzy sets. Information and Control, Vol. 8, Issue 3, 1965, p. 338-353, ISSN 0019-9958, 1965.
- ZHANG, Q.; CANOVA, M. Modeling and output feedback control of automotive air conditioning system. International Journal of Refrigeration, Vol. 58, p. 207-218, 2015.
- ZHANG, Q.; STOCKAR, S.; CANOVA, M. Energy-optimal control of an automotive air conditioning system for ancillary load reduction, IEEE Transactions on Control System Technology, Vol. 24, No 1, 2016.
- ZILOUCHIAN, A.; JAMSHIDI, M. Intelligent Control Systems Using Soft Computing Methodologies. 1ª Edição. Boca Raton: CRC Press, 2000.
- ZHOU, K.; DOYLE, J. Essentials of robust control. New York: Prentice Hall, 1998.
- WANG, S. K. Handbook of air conditioning and refrigeration. New York: McGraw-Hill, 2000.