

CONTROLE DA ROTAÇÃO DE MOTOR DE VENTILADOR AXIAL DE SOPRO LIVRE PARA O CONFORTO TÉRMICO

Magalhães Filho, P., pfilho@feg.unesp.br¹
Ferreira Sobrinho, J. P., jp.spectro@itelefonica.com.br²
Bianchi, I., ibianchi@feg.unesp.br¹
Castro, J. N. C., nedilo@feg.unesp.br¹

¹UNESP-Univ Estadual Paulista, Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, 12.516-410, Guaratinguetá, SP

²Spectrum E. C., Rua George Eastman, 651, Apto. 31, Bl 06, Pq. Industrial, 12.237-640, São José dos Campos, SP

Resumo: O trabalho apresenta um dispositivo para controle de rotação por sensor de temperatura de motor de ventilador axial de sopro livre, em particular, de ventiladores de mesa, com diâmetro externo de 40 cm. Em pesquisa de campo observou-se que os ventiladores, em sua totalidade, utilizam o mesmo tipo de controle do motor de corrente alternada (motores de pólos sombreados), ligados na rede elétrica residencial, em 127 ou 220 V_{ac}. Eles possuem controles manuais liga-desliga, com três velocidades de rotação, manualmente selecionadas e de acordo com os enrolamentos do motor, sendo mínima, média e máxima. Esse fato incentivou e motivou o desenvolvimento de um equipamento de controle eletrônico automático de velocidade, utilizando-se para isso de um sensor de temperatura e um circuito eletrônico, inicialmente ajustado para três níveis de temperatura ambiente. Neste dispositivo de controle foram utilizados relés para fazer a variação automática de rotação do motor. Na evolução do dispositivo foi utilizado um microcontrolador PIC-16F877, ao invés de relés, e através de sua programação, foi conseguido o controle automático desejado. Assim, este trabalho apresenta ao mercado uma alternativa hoje inexistente para o controle de rotação deste tipo de motor, a qual objetiva a melhoria de conforto térmico.

Palavras-chave: conforto térmico, controle de rotação, sensor térmico

1. INTRODUÇÃO

O acionamento de ventilador axial de sopro livre para conforto, na sua maioria, é feito por motor elétrico, pois combina as vantagens da energia elétrica – baixo custo, facilidade de transporte, limpeza e simplicidade de comando – com sua construção simples, custo reduzido, grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos, melhores rendimentos, sendo uma das formas de conversão de energia que menos agride o meio-ambiente.

Os motores de corrente alternada (AC) são os mais utilizados, pois a distribuição de energia elétrica é feita normalmente nesta classe. Seu princípio de funcionamento é baseado no campo magnético girante, que surge quando da aplicação de correntes alternadas defasadas no tempo em bobinas deslocadas no espaço (Del Toro, 1999). Os eletrodomésticos, quando acionados por corrente alternada, utilizam em seu acionamento, basicamente, dois tipos desses motores: universal e pólos sombreados.

O motor universal é utilizado em situações distintas: baixas velocidades para grandes cargas e altas velocidades para pequenas cargas. O conjugado de partida também é elevado. É fabricado em potências fracionárias de até $\frac{3}{4}$ cv (552 W) (Fitzgerald et al, 2006). Sua utilização é comum em pequenos eletrodomésticos, tais como, furadeiras e lixadeiras, que requerem conjugados elevados, e em liquidificadores, aspiradores de pó e outros equipamentos que requerem alta rotação.

O motor de pólos sombreados é um motor de indução, também denominado de campo distorcido, sendo o mais simples e econômico dos motores de pequeno porte. O sentido de rotação depende do modo construtivo do pólo. Conseqüentemente, o motor de campo distorcido apresenta um único sentido de rotação (Franchi, 2007). Quanto ao desempenho, os motores de campo distorcido apresentam baixo torque de partida (15 a 50% do nominal), baixo rendimento e baixo fator de potência. Devido a esse fato, eles são normalmente fabricados para pequenas potências, que vão de alguns milésimos de cv a $\frac{1}{4}$ cv (184 W). De forma geral, o controle de velocidade dos motores de campo distorcido consiste em reduzir a tensão de alimentação aplicada. Esses motores são ideais para eletrodomésticos dos tipos: movimentação de ar (ventiladores, exaustores, purificadores de ambiente, unidades de refrigeração, secadores de roupa e de cabelo, pequenas bombas e compressores, brinquedos, etc.), ou seja, em aplicações domésticas, onde o torque de partida é reduzido.

Nesses equipamentos predomina o fluxo axial do ar através do elemento que faz a movimentação deste, definindo neste trabalho, a escolha desse tipo de motor para estudo do controle de sua rotação.

Os ventiladores axiais de mesa apresentam as mesmas características construtivas e de funcionamento desde a sua criação; o que evoluiu foram os tipos de motores utilizados. No entanto, os sistemas de controle são os mesmos tradicionalmente empregados, pois são manuais e conseqüentemente com a interferência do usuário.

Esses sistemas de controle de rotação de eletrodomésticos para conforto térmico têm atuação direta sobre a variação do ponto de inserção no enrolamento do motor elétrico acionador. Normalmente essas inserções são programadas de maneira que não afete a curva de conjugado resistivo do conjunto motor-rotor. Praticamente têm-se três pontos na escala de operação, variando-se a rotação do motor e, conseqüentemente a quantidade de ar movimentada. Os três níveis de rotação variam de forma descontínua a velocidade de giro do conjunto de pás (rotor), através da conexão feita a cada um dos três enrolamentos da bobina do motor do conjunto. Este tipo de controle não possui realimentação automática.

Uma alternativa a esse controle, que é feito pela interferência do usuário, seria a substituição por um circuito eletrônico automático, através da atuação de um sensor térmico, quando houver variação de temperatura do ar ambiente. Assim, quando aumentar a temperatura ambiente, o sistema incrementaria a rotação do conjunto, que seria decrementada quando a temperatura diminuísse, trazendo conforto ao usuário, e desligando automaticamente o ventilador quando a temperatura atingir valor inferior àquele estabelecido pelo dispositivo. Este procedimento resultaria numa diminuição do tempo de funcionamento, podendo proporcionar redução no consumo de energia.

Com este propósito, este trabalho apresenta um dispositivo de controle de rotação de motor de acionamento de ventiladores axiais de sopro livre, para conforto térmico e/ou resfriamento de corpos, superfícies e equipamentos, a partir de sensor térmico, cujo acionamento é feito pela variação da temperatura do fluxo de ar que atravessa o conjunto motor-ventilador. Foram visados ventiladores de uso doméstico de baixo custo, podendo a técnica ser aplicada às outras classes de equipamentos.

2. FUNDAMENTAÇÃO PARA SELEÇÃO DE PARÂMETROS

A condição de conforto térmico a que está sujeita uma pessoa em um ambiente interno, é normatizada através da ISO 7730 (2005), a qual é baseada nos estudos realizados por Fanger (1972). Esses estudos que foram realizados em câmaras climatizadas, onde o pesquisador possuía total controle sobre as condições ambientais, analisaram as respostas psicofisiológicas relativas a percepção térmica de um grupo de pessoas quando submetidas a variações ambientais efetuadas nessa câmara. Esses estudos foram baseados no modelo físico de balanço de calor entre o homem e o meio ambiente, através do qual todo o calor gerado pelo organismo humano pela execução de atividades deve ser dissipado em igual proporção ao ambiente, a fim de que não haja nem acúmulo nem perda excessiva de calor no interior do organismo. Dessa maneira, o organismo humano pode ser comparado a uma “máquina térmica”, a qual gera calor quando executa algum tipo de trabalho. O calor gerado pelo organismo deve então ser dissipado em igual proporção ao ambiente, para que não se eleve nem diminua a temperatura interna do corpo. Como o homem é um animal homeotermo, esse desequilíbrio ocasionado entre a geração e a dissipação de calor pelo organismo pode causar sensações desconfortáveis, ou mesmo patologias em casos mais extremos (estresse térmico).

Os estudos de Fanger (1972) geraram então um modelo analítico para a determinação das condições de conforto térmico, conhecido como modelo do PMV, “Predicted Mean Vote”, que também pode ser entendido como “sensação analítica de conforto térmico”. Esse modelo leva em consideração seis variáveis, sendo quatro variáveis ambientais, como temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade do ar, e duas variáveis pessoais ou subjetivas, taxa metabólica ou produção de calor pelo organismo e isolamento térmico das vestimentas utilizadas. Essas seis variáveis caracterizam por sua vez, os mecanismos de troca de calor interagindo entre o homem e o ambiente.

A partir de Fanger (1972), muitos outros estudos sobre conforto térmico foram realizados, não mais em câmaras climatizadas, mas sim em situações reais do cotidiano, mais notadamente os estudos realizados por Humphreys (1976), Auliciems (1981), Nicol (1993) e no Brasil os realizados por Araújo (1996) e Xavier e Lamberts (1999).

As duas correntes de pesquisa, em câmaras climatizadas e através de estudos de campo, embora oriundas de metodologias distintas e com resultados também distintos, possuem o mesmo objetivo final: a busca das condições que mais satisfaçam o ser humano, com relação às suas sensações térmicas.

Verifica-se nesses estudos, que nas equações utilizadas no balanço térmico entre o homem e o ambiente, todos os seus termos são expressos em função de variáveis ambientais ou físicas e de variáveis pessoais.

Do modelo do PMV foram selecionadas duas variáveis ambientais consideradas importantes para o presente trabalho: temperatura do ar e sua velocidade. A temperatura do ar ao redor do corpo humano é levada em consideração nos estudos de conforto térmico para determinar-se a troca de calor por convecção entre a pessoa e o ambiente ao redor, sendo essa variável medida através de sensores, e também se destacando que em ambientes térmicos, a velocidade do ar, considerada a magnitude do vetor velocidade do fluxo de ar no ponto de medição, deve ser levada em consideração devido à sua participação na transferência de calor por convecção e por evaporação na posição da pessoa, podendo ser determinada por anemômetros.

Os poucos dados existentes a respeito das condições de conforto térmico em relação às atividades desenvolvidas pelo povo brasileiro, faz com que parâmetros e limites estipulados em outros países, de condições climáticas bastante diversas das brasileiras, sejam aqui utilizados pelos projetistas de sistemas de ventilação e ar condicionado, e mesmo no projeto de ventiladores domésticos.

Ao se comparar a zona de conforto proposta pelos dados obtidos pelo trabalho de Xavier e Lamberts (1999) na região de Florianópolis, com a zona de conforto proposta pela ASRHAE (2004), obtida em outros países, com mesmas características climáticas, nota-se que a população pesquisada apresenta-se mais sensível com relação às variações da temperatura do ar. O limite inferior da temperatura para conforto foi da ordem de 19,9°C, e o limite superior foi da ordem de 25,8°C. Como as temperaturas observadas durante o trabalho de Xavier e Lamberts (1999) foram bastante amenas, situação normal de Florianópolis e Sul do Brasil, clima temperado, se aproximando das condições ambientais a que estão acostumadas as pessoas desses outros países, era natural que os limites de temperatura aceitos como confortáveis pelas pessoas dessa região se aproximasse dos limites desejados propostos pela ASRHAE (2004). Por esses estudos os limites aceitos como confortáveis são respectivamente de 20°C e 27°C.

Existe um valor hipotético de temperatura definido pelo hipotálamo como adequado. Este é o *set point*, ou "ponto de ajuste" (no homem, em condições normais, esse valor é em média de 36°C a 37°C) ao qual será comparada a temperatura do corpo a cada momento. O próprio hipotálamo pode ajustar o ponto crítico de segurança para desencadear respostas de perda ou ganho de calor antecipadamente, prevenindo assim grandes variações de temperatura interna (Berne e Levy, 2005; Guyton, 2002).

Para ambientes sem condicionamento térmico artificial, Humphreys (1978) identificou o comportamento da temperatura média confortável em ambiente interior, ou temperatura neutra, como sendo função da temperatura média mensal do ambiente exterior.

Roriz (2003) discute as flutuações horárias dos limites de conforto térmico, aplicando as conclusões de Humphreys (1978) aos climas das cidades de Campos do Jordão (SP) e Fortaleza (CE). Analisando-se os casos das duas cidades, observa-se que em janeiro as temperaturas de conforto podem variar, desde 19°C em Campos do Jordão, até 28,5°C em Fortaleza. Entre os meses de junho e julho a variação é ainda maior, entre 15 e 27,5°C.

Para fins de fixação de faixa de temperatura de conforto com o objetivo de se controlar a velocidade do ar proveniente do ventilador, objeto deste trabalho, escolheu-se a temperatura de 25°C, como sendo a temperatura, acima da qual, o dispositivo a ser desenvolvido, acionaria e passaria a controlar a velocidade de giro do rotor do ventilador.

Quanto à determinação da velocidade do ar e o local de medição, deu-se atenção ao escoamento do ar através dos rotores axiais de sopro livre, pois este fluxo é muito peculiar. De acordo com a Fig. (1), este tipo de rotor suciona uniformemente por todos os lados e sopra uma corrente concentrada com rotação, formando um vórtice interno. Essa sucção pode ser comparada com um sumidouro. A excepcional característica deste fluxo é que em frente ao rotor há resistentemente um traço de ar em movimento, notando que o ponto de maior alcance localiza-se na direção axial, o que definiu a forma e o local de se determinar a velocidade e a temperatura do ar a uma distância fixa entre os instrumentos de medida e o plano de giro do rotor.

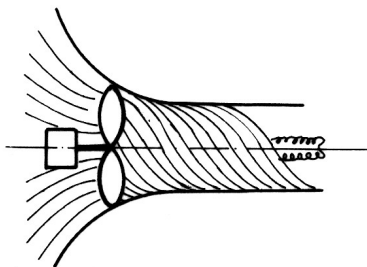


Figura 1. Fluxo de ar através de um rotor axial de sopro livre.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Pesquisa de Campo

A pesquisa de campo foi realizada na cidade de São José dos Campos (SP), que tem aproximadamente 600 mil habitantes, para se obter uma amostra significativa e qualitativa do equipamento em foco, "ventiladores de mesa", em pontos de comercialização dos mesmos. O objetivo dessa pesquisa foi verificar modelos existentes e inovações apresentadas. Concluiu-se, pela análise do resultado da pesquisa, que não há inovações notáveis, que possam ser considerados avanços tecnológicos. Os equipamentos, construtivamente e visualmente, permanecem basicamente os mesmos ao longo de muitos anos. Em todos os elementos da amostra, foi constatado que a técnica utilizada para controle da velocidade de giro das pás é a mesma, ou seja, controle escalonado em três níveis, utilizando a intervenção manual do usuário, em comandos que atuam em pontos do enrolamento da bobina do motor elétrico de acionamento do conjunto.

Decidiu-se escolher um ventilador de mesa marca Arno, modelo Versátil FD-40, para objeto de desenvolvimento e inovação tecnológica do dispositivo de controle da velocidade de giro das pás, com as seguintes características:

- a) Diâmetro nominal do rotor de 40 cm;
- b) Faixa de potência elétrica nominal do motor acionador de 48 a 126 W;

c) Acionamento feito por motor de indução do tipo pólos sombreados.

3.2. Bancada de Testes e Metodologia

A bancada de testes com ventiladores axiais de sopro livre de uso doméstico, utilizando anemômetro em distâncias predefinidas é normatizada pela IEC 60665 (1980), tendo como objetivo a determinação da velocidade de penetração do fluxo de ar e a distribuição desta em uma área frontal, Fig. (2), para garantir que o usuário receba o ar em condições de conforto.

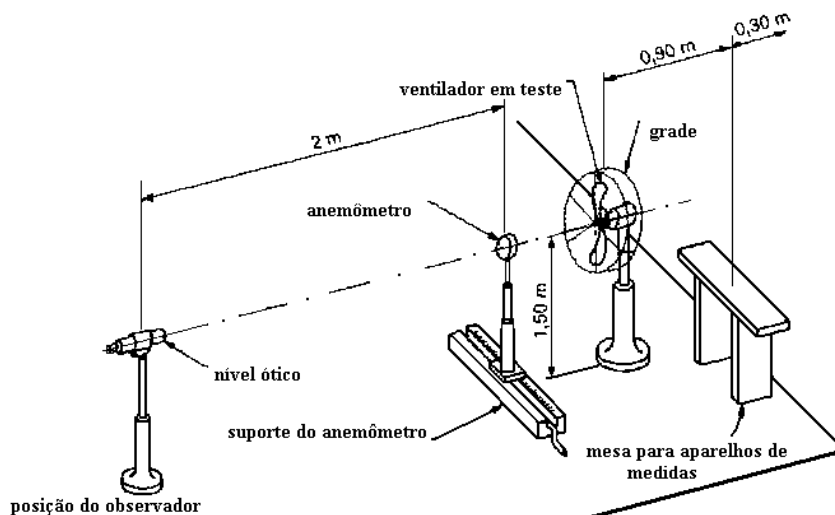


Figura 2. Esquema da bancada de testes.

Tendo sido selecionado o aparelho para o qual se desenvolveu o dispositivo de controle da velocidade de giro, foi montada a bancada de testes, mantendo-se uma distância predefinida de 1 metro entre o plano de giro do rotor do ventilador, indicado por estroboscópio digital, e o ponto de medida da velocidade do ar, com anemômetro mecânico digital (Fig.(3)). Para o alinhamento do eixo do ventilador com o do anemômetro foi utilizado um nível ótico topográfico. As grandezas elétricas foram determinadas utilizando-se multímetro digital e a temperatura do ar por termopares.



Figura 3. Posição do anemômetro.

3.3. Componentes dos circuitos elétricos e eletrônicos

Os componentes dos circuitos de acionamento e controle foram adquiridos como itens disponíveis no mercado.

4. DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO

Para obtenção do dispositivo completo foram necessárias diversas fases para que se pudesse observar e compreender as necessidades de partida e forma de onda, que resultaram nos procedimentos que serão detalhados na seqüência deste trabalho.

4.1. Desenvolvimento utilizando TRIAC

O primeiro circuito desenvolvido foi o de controle linear utilizando TRIAC. O objetivo deste circuito desenvolvido preliminarmente foi o de verificar o comportamento do motor utilizado no ventilador, levantando parâmetros técnicos como: variação da rotação, conjugado resistente das pás, temperatura de estabilização do motor em regime permanente, vazão de ar, níveis de corrente e tensão, e consumo de energia elétrica.

Todos os ventiladores domésticos avaliados na pesquisa de campo usam controle de velocidades, baseado na comutação escalar da energia elétrica aos enrolamentos do motor. Baseado neste fato foi aplicado este princípio de controle linear para variar a tensão aplicada ao enrolamento relativo à maior velocidade do motor.

O circuito elaborado utilizou um tiristor-triac que é um semicondutor para controle de potência (TIC-246D), compatível com a tensão da rede, que tem a vantagem de ser disparado e colocado a conduzir, com qualquer sentido de corrente, o que o habilita a operar em sistemas de corrente alternada. Utilizou-se para o disparo do TRIAC, um outro elemento semicondutor, também da família dos tiristores, que é o DIAC (D83). Trata-se de um elemento bidirecional de disparo, que se assemelha ao TRIAC, possuindo também anodo e catodo, menos a porta de gatilho, e indicado para o disparo. Mostrado no esquema da Fig.(4), controlou-se o ponto de disparo através de uma rede de retardo formada pelo potenciômetro P1 (100 k Ω), a resistência R2 (13 k Ω) e do capacitor C2 (0,1 μ F), determinando a parcela, em cada semiciclo da alimentação de corrente alternada, que é aplicada ao motor do ventilador, de acordo com os ângulos de disparo, controlados linearmente pelo potenciômetro.

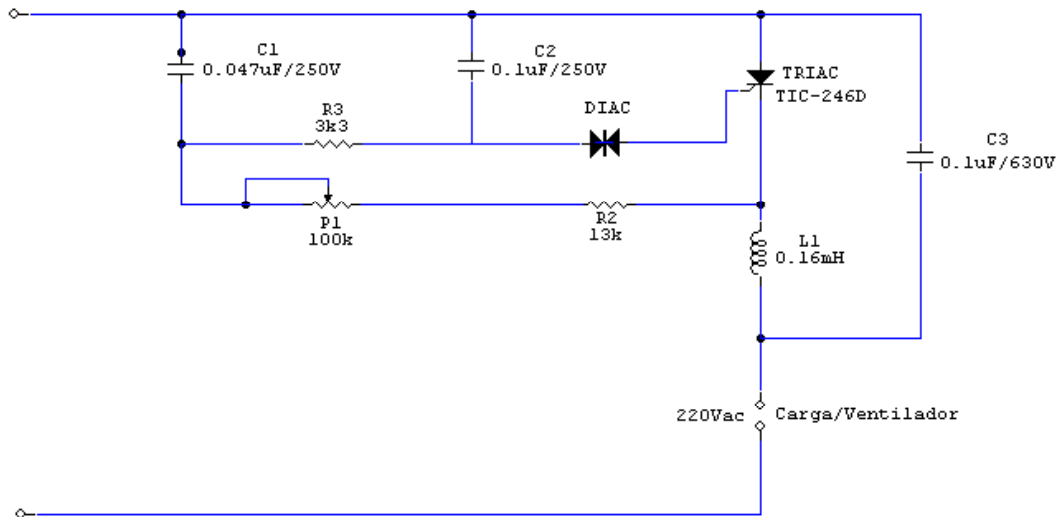
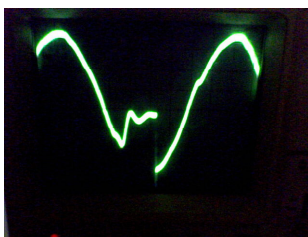


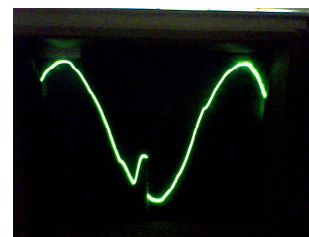
Figura 4. Diagrama do circuito com TRIAC.

Quando se controlam cargas indutivas comutadas, como no caso do motor do ventilador, deve-se proteger o circuito de acionamento, no caso o TRIAC, das altas tensões que são induzidas. Isso foi feito pelo circuito formado pelo capacitor C3 (0,1 μ F) e pelo indutor L1 (0,16 mH), que amortece os pulsos da alta tensão sobre o TRIAC. Houve também a necessidade de um dissipador de calor para o TRIAC. O circuito completo foi intercalado entre a rede de alimentação de energia elétrica e a carga, no caso o ventilador em questão.

A forma de onda obtida para o potenciômetro ajustado para a menor velocidade de giro (100 k Ω) é mostrada na Fig.(5). Verifica-se que a quantidade de potência entregue à carga é menor, ao se comparar com a forma de onda obtida para o potenciômetro ajustado para permitir a maior velocidade de giro (0 Ω) também mostrada na (Fig. (5)).



P1 em 100 k Ω



P1 em 0 k Ω

Figura 5. Formas de onda para menor e maior rotação.

4.2. Desenvolvimento utilizando relé

Foi desenvolvido um segundo circuito ao qual adicionou-se um controle automático de variação escalonado de velocidade, através de três relés, cada um chaveando um enrolamento do motor acionador, para as velocidades: mínima, média e máxima, com o objetivo de se inserir o sensor de temperatura e observar o comportamento do conjunto. O diagrama de blocos da montagem é apresentado na Fig. (6).

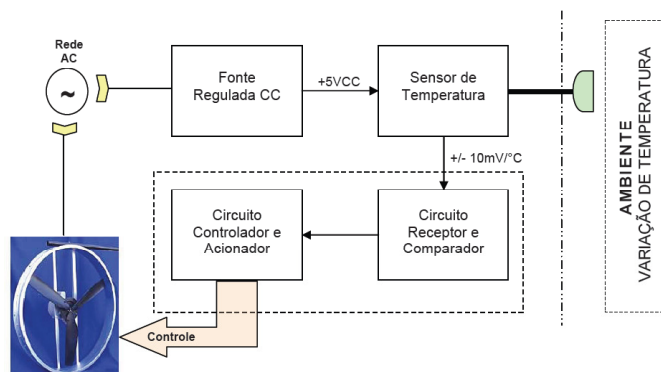


Figura 6. Diagrama de blocos.

O sensor de temperatura adequado ao funcionamento do circuito foi o LM-35 (*Precision Centigrade Temperature Sensors*), que possui três terminais. Um deles envia um sinal elétrico, que varia de acordo com a temperatura, obtida pelo sensor no ambiente. Este sensor trabalha linearmente dentro de uma faixa de temperatura de -55 a 150 °C.

O interfaceamento da leitura foi conseguido pela conexão com um circuito integrado, que seleciona de acordo com as três faixas definidas de temperatura, o respectivo relé que irá operar. Portanto no aumento da temperatura ambiente, a partir da de conforto, o sensor detectará este efeito, acionando a velocidade mínima do motor do ventilador. Com um novo incremento, passa à velocidade média e em seguida, se houver novo incremento, passa para a velocidade máxima. Na diminuição dos níveis de temperatura, ocorrerá o contrário.

4.3. Desenvolvimento utilizando microprocessador

Nesta fase do desenvolvimento já tinha sido observada a necessidade de se ter um circuito para acionamento do motor e um outro para o controle. Para facilitar o processo de desenvolvimento, inicialmente foi construído um circuito para controle da rotação de motor de corrente contínua (DC), e após análise dos resultados, o circuito foi adequado para acionar e controlar o motor de indução do tipo pólos sombreados (AC).

4.3.1. Desenvolvimento usando motor de corrente contínua

Para este circuito utilizou-se o mesmo sensor de temperatura (LM-35) do circuito com relé, que foi adequado e teve um desempenho satisfatório. Na saída do sensor obtém-se uma tensão de 10 mV para cada °C. A tensão de saída para 32 °C é de 300 mV. Utilizou-se um circuito integrado operacional (CA-3140), como elemento amplificador de sinal que insere a tensão no conversor analógico/digital (A/D), interno ao microcontrolador (PIC), inovação que foi inserida no circuito, que é um componente otimizado para controle genérico de circuitos, ou seja, um microprocessador, com memória e interfaces integradas. Este circuito de controle desenvolvido é mostrado na Fig. (7), na qual, por questão de simplificação está omitida a ligação física do *driver* de RS 232, para “interfaceamento” entre os sinais TTL e RS 232 de transmissão do PIC para o *software* e vice e versa, normalmente utilizado pelos projetistas, o MAX 232, para o qual este foi concebido.

Para o funcionamento do microcontrolador é necessário gerar uma base de tempo precisa, ou seja, um circuito de oscilação (*clock*), composto pelos capacitores C1 e C2 (27 pF) e um cristal de quartzo (X1). A frequência utilizada foi de 4 MHz.

O microcontrolador escolhido foi o PIC-16F877, que faz parte de uma família de microprocessadores fabricados pela *Microchip Technology Incorporated*, que processa dados de 8 bits, com extensa variedade de modelos e periféricos internos, com arquitetura *Harvard* e conjunto de instruções *RISC*, com recursos de programação por memória *Flash* e *EEPROM*. Funcionam com tensões de alimentação de 2 a 6 V_{dc}.

Através de sua adequada programação, é capaz de receber as informações do sensor de temperatura, devidamente calibrado junto ao amplificador operacional, e através dessa informação controlar a velocidade de um motor por meio de um transistor de potência (TIP-31), atuando como chave.

Além disso, com a utilização do microcontrolador PIC-16F877, pode-se acrescentar um *display* de cristal líquido (LCD-JHD 162A), para apresentar a temperatura de referência (*set point*) e a temperatura indicada pelo sensor.

O circuito possibilita ainda uma interface, através de uma porta serial de um microcomputador, de forma que o *software* desenvolvido possa fazer o ajuste do *set point*. Este *software*, desenvolvido em linguagem Delphi, mostra a temperatura ambiente e também a velocidade de giro do eixo do motor (rotação). O ajuste da temperatura dá o *start* ao funcionamento do motor do ventilador. Com a utilização do microcontrolador e de sua programação reduziram-se consideravelmente os componentes do *hardware*.

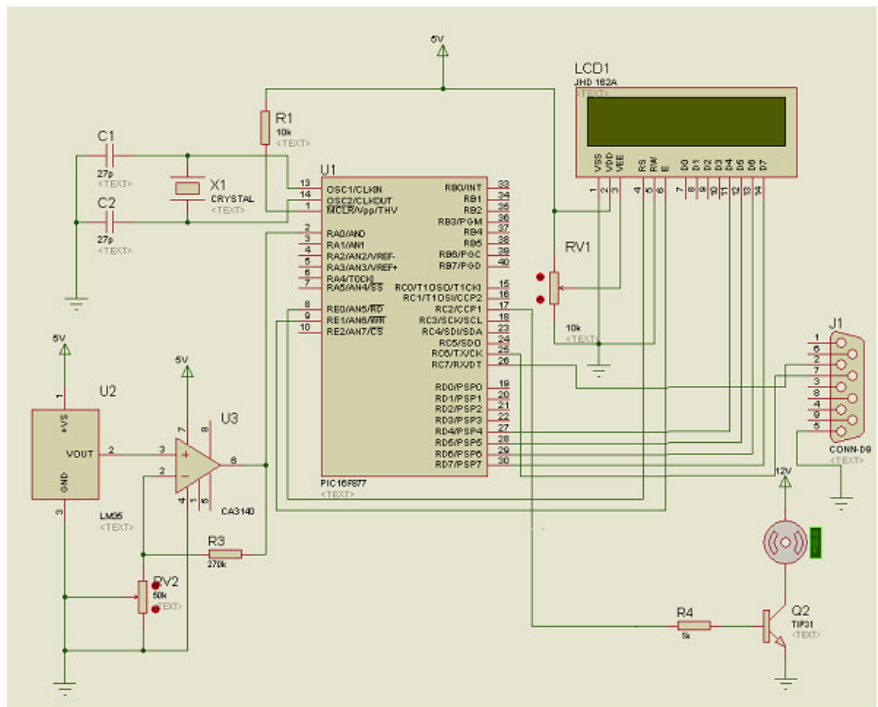


Figura 7. Diagrama do circuito de controle sem o *driver* de RS 232.

4.3.2. Desenvolvimento usando motor de corrente alternada

Para verificação do controle da potência entregue ao enrolamento de maior velocidade de giro do motor, inicialmente utilizou-se controle manual através de dois pulsadores (*push-button*), sendo suas funções um para incremento e outro para decremento da intensidade de energia disponível para alimentação da carga, controlando dez níveis sobre cada semiciclo da rede AC. Este incremento ou decremento define o tempo de condução do TRIAC.

Um *software* foi desenvolvido com a finalidade de atingir este objetivo, utilizando o mesmo microcontrolador PIC-16F877 do circuito de acionamento do motor DC.

A interrupção externa habilitada do microcontrolador foi utilizada para detectar a passagem por zero da tensão da rede de alimentação (AC), o qual é o ponto de referência utilizado no circuito de controle de potência a qual foi conseguida através da inserção de dois opto-acopladores (4N25).

Um contador implementado no *software* foi empregado para temporizar o ângulo de condução de cada semiciclo da corrente alternada. Este ângulo de condução quando temporizado no início do semiciclo da corrente alternada, entrega a máxima potência à carga para uma tensão de alimentação de 125,7 V_{ac} e saída de 123,6 V_{ac}, obtendo-se a máxima velocidade de giro do motor. Se temporizado no final do semiciclo sob tensão de alimentação de 126,9 V_{ac} e saída 75,1 V_{ac}, o motor encontra-se parado, conseqüentemente a mínima potência é entregue, conforme mostrado na Fig. (8).



Figura 8. Formas de onda (a) para maior rotação e (b) motor parado.

No circuito de acionamento utilizou-se o mesmo princípio de disparo do circuito com TRIAC, pois a técnica utilizada teve sucesso.

Neste novo desenvolvimento, agora utilizando microprocessador, inicialmente foi utilizado a mesma frequência de 4 MHz gerada pelo oscilador a cristal de quartzo (X1), no circuito mostrado na Fig. (7), para gerar a temporização adequada onde cada instrução de comando do microcontrolador é executada a cada 1 μ s. O uso desta frequência não atendeu com plenitude o efeito desejado. Para um melhor desempenho do circuito de controle, substituiu-se o cristal de quartzo por outro de 20 MHz, onde cada instrução é executada a cada 0,2 μ s.

Na construção da parte de potência foram utilizados um opto-diac (MOC-3010) e o mesmo TRIAC (TIC-246D) do circuito mostrado na Fig. (4). A função do opto-diac é isolar a porta do microcontrolador da corrente que flui pelo TRIAC, resultando no circuito esquematizado na Fig. (9).

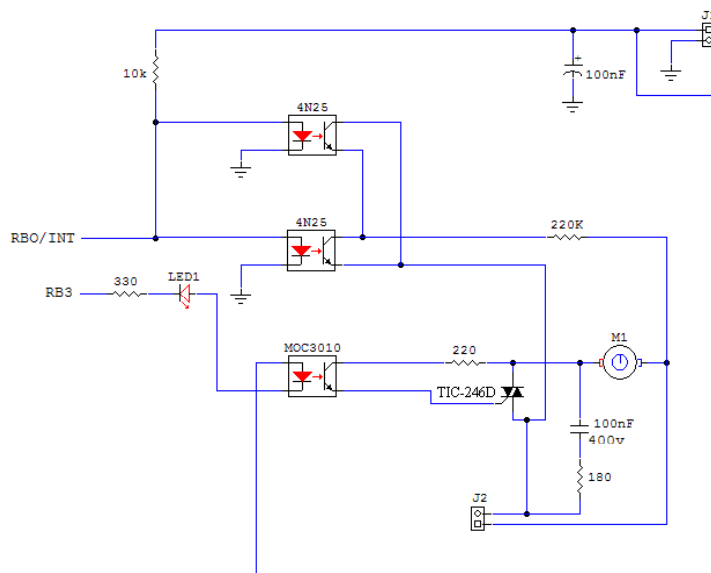


Figura 9. Circuito de acionamento para motor AC.

Após testes com carga resistiva, esta foi substituída pela carga indutiva necessária para os testes (motor de pólos sombreados). O ajuste de tempo do contador interno do PIC no *software* de controle foi obtido em intervalos de 7 ms.

Na seqüência do desenvolvimento substituiu-se o circuito de acionamento do motor DC, pelo circuito para acionamento do motor AC, Fig. (9), o qual contém a ligação do *hardware* ao microcontrolador, obtendo-se o dispositivo de controle da rotação, por sensor de temperatura, do motor do ventilador selecionado na pesquisa de campo, mostrado na Fig. (10).



Figura 10. Circuitos acoplados de acionamento e controle com microprocessador para motor AC.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um primeiro circuito, onde a variação discreta da velocidade dos ventiladores domésticos avaliados na pesquisa de campo, foi substituída por uma variação linear contínua, através de um potenciômetro, onde a tensão de alimentação, em 127 ou 220 V_{ac}, foi aplicada ao maior enrolamento (maior velocidade de giro) do motor acionador, no qual foi utilizado o princípio de controle usual nos circuitos *dimmers*, onde se dispara um TRIAC de potência, através do comando de um DIAC. Através desse circuito, observou-se o comportamento do motor para o mínimo de energia entregue à carga, para vencer o torque de partida, bem como a máxima energia entregue para sua velocidade maior.

Com o registro dessas formas de onda pode-se observar o comportamento do motor nas diferentes rotações, pois, tendo maior descontinuidade na senóide, será entregue menor valor médio de potência. Analogamente a mesma coerência de resultados foi observada para a situação de maior velocidade, Fig. (5). Este tipo de controle linear utiliza o todo da bobina de enrolamento do motor, portanto com melhor eficiência no aproveitamento do cobre, proporcionando à máquina uma maior potência específica.

A partir dos resultados obtidos no circuito anterior, foi desenvolvido um novo circuito de controle utilizando-se relés, adicionando-se um sensor de temperatura (LM-35), bem como a definição das faixas de temperaturas a serem ajustadas. Dessa forma, o controle escalonado para as velocidades manteve-se similar ao controle manual de três velocidades, porém agora automatizado. Nessa fase do desenvolvimento, foi inserido o microcontrolador PIC-16F877, amplamente utilizado atualmente no controle e acionamento de cargas. Este microcontrolador foi escolhido devido às facilidades de programação, à disponibilidade do dispositivo programador, e de apresentar características de múltiplas entradas e saídas, necessárias para os testes no desenvolvimento, tanto no *hardware* como no *software*.

O desenvolvimento utilizando-se microcontrolador permitiu que as variações de temperaturas obtidas pelo sensor (LM-35) fossem convertidas em variações de níveis de tensão pelo microcontrolador PIC, e assim sendo efetuado o controle de rotação de motor em níveis DC. Para o funcionamento do microcontrolador foi necessário gerar uma base de tempo estável e precisa, que é o circuito de *clock*, com um cristal oscilador de quartzo. Utilizou-se a frequência de 4 MHz. Com a utilização do microcontrolador pode-se acrescentar um display de cristal líquido (LCD-JHD 162A), que mostra as temperaturas de referência e a ambiente, indicada pelo sensor. Possibilita ainda uma interface, através de uma porta serial de um microcomputador, onde através de um *software* especialmente desenvolvido, ajustar a temperatura de referência.

Foi realizado um estudo de como informar ao microcontrolador PIC, além dos dados fornecidos pelo sensor de temperatura, também de como interpretar a energia disponível pela rede de alimentação de 127 ou 220 V_{ac} para acionamento do motor do ventilador. Foi necessário estabelecer-se a referência de como se comporta a forma de onda senoidal com respeito à sua passagem do semiciclo positivo para o negativo e vice-versa. A solução foi encontrada com a utilização de dois optoacopladores (4N25), para detectar as passagens por zero da onda senoidal, permitindo a interpretação correta pelo microcontrolador PIC.

Utilizou-se o princípio de comando do disparo de um TRIAC inicialmente implementado, sendo seu comando agora realizado por um optodiac (MOC-3010), que além de efetuar o comando, efetua também o isolamento do circuito de controle do de potência.

Um novo *software* foi desenvolvido para o acionamento do circuito de potência, sendo adicionados ao circuito de controle dois botões pulsadores, com a finalidade de incrementar e decrementar a quantidade de energia entregue a carga, para fins de simulação. Em seqüência, foram estabelecidos dez níveis discretos de controle incremental/decremental, obtendo-se um melhor funcionamento do controle sobre a carga, e alterado o cristal de quartzo oscilador para uma frequência maior, de 20MHz. Substituiu-se o circuito de acionamento do motor DC, pelo circuito de acionamento do motor AC. Com esse novo circuito e com as alterações no *software*, obteve-se o funcionamento completo do dispositivo de controle automático de velocidade do motor AC, com sensor de temperatura, microcontrolador e *display* indicativo, obtendo os dados apresentados na Tab. (1).

Tabela 1. Circuito com microprocessador e motor AC.

	tensão da rede (V)	corrente no motor (mA)	potência no motor (VA)	velocidade do ar no anemômetro (m/s)	temperatura do ferro do motor (°C)	temperatura do ar no sensor (°C)
1	220	697	153,3	3,90	54,4	24
2	220	702	154,4	4,68	54,2	26
3	220	706	155,3	5,45	54,2	28
4	220	707	155,5	5,68	56,7	30
5	220	708	155,8	5,90	56,7	34

Concluiu-se que os microcontroladores específicos para comando e controle de velocidade são aplicáveis para este fim. Através da elaboração de *software* adequado na programação de microcontroladores, reduz-se consideravelmente o *hardware*, diminuindo o seu tamanho físico e custo.

O desenvolvimento desse dispositivo permitiu obter alguns incrementos tecnológicos:

- Possível economia de energia: o circuito desenvolvido desliga-se automaticamente, de acordo com o *set point*;
- O circuito não utiliza *taps*: o motor poderá ter apenas uma bobina, com redução de componentes e custo;
- Segurança: desligamento automático quando a temperatura ambiente cai abaixo do *set point*;
- Variação do conforto térmico: a interpretação de sensação térmica varia entre os indivíduos, de região para região; o dispositivo de controle permite ajustes; a rotação varia de acordo com a alteração da temperatura;
- Não possui teclas mecânicas ou chaves: evitam-se desgastes mecânicos e intervenção manual.

6. REFERÊNCIAS

- American Society of Heating, Ventilating and Air-Conditioning Engineers - ANSI/ASHRAE 55, 2004, "Thermal environmental conditions for human occupancy", Atlanta, USA.
- Araújo, V. M. D., 1996, "Parâmetros de conforto térmico para usuários de edificações escolares no litoral nordestino brasileiro", Tese de Doutorado, FAU - Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Auliciems, A., 1981, "Towards a Psycho-physiological Model of Thermal Perception", International Journal of Biometeorology, Springer Berlin/Heidelberg, Vol. 25, No. 2, pp. 109-122.
- Berne, R. e Levy, M., 2005, "Fisiologia", 5. ed., Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, 1034p.
- Del Toro, V., 1999, "Fundamentos de Máquinas Elétricas", Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 550p.
- Fanger, P. O., 1972, "Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering", McGraw-Hill Book Company, New York, 244p.
- Fitzgerald, A.E., Kingsley Jr, C. and Umans, S.D., 2006, "Máquinas Elétricas", 6.ed., Bookman, Porto Alegre, 648p.
- Franchi, C.M., 2007, "Acionamentos Elétricos", Editora Érica, São Paulo, 250p.
- Guyton, A.C., 2002, "Tratado de Fisiologia Médica", 10. ed., Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, 975p.
- Humphreys, M. A., 1976, "Field Studies of Thermal Comfort Compared and Applied", Building Services Engineer, Garston, Watford - U.K, Vol. 44, pp. 5-27.
- Humphreys, M. A., 1978, "Outdoor Temperatures and Comfort Indoor", Building Research and Practice, Garston, Watford - U.K, Vol. 6, pp. 92-105.
- International Electrotechnical Commission - IEC 60665, 1980, "A. C. electric ventilating fans and regulators for household and similar purposes", Geneve, Switzerland.
- International Organization for Standardization - ISO 7730, 2006, "Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria", Geneve, Switzerland.
- Nicol, J. F., 1993, "A Handbook for Field Studies Toward an Adaptive Model", University of East London, London.
- Roriz, M., 2003, "Flutuações Horárias dos Limites de Conforto Térmico: Uma Hipótese de Modelo Adaptativo". Anais do 7º Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído - ENCAC, 3ª Conferência Latino-Americana sobre Conforto e Desempenho Energético de Edificações - COTEDI, Curitiba, pp. 338-345.
- Xavier, A. A. P. and Lamberts, R., 1999, "Thermal Comfort in Free Running School Buildings, in South Brazil", Proceedings of the 2nd European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, 3rd International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings, Lyon, France, pp. 213-218.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

CONTROL OF THE ROTATION OF AXIAL FREE-FLOW FAN MOTOR FOR THE THERMAL COMFORT

Magalhães Filho, P., pfilho@feg.unesp.br¹

Ferreira Sobrinho, J. P., jp.spectro@itelefonica.com.br²

Bianchi, I., ibianchi@feg.unesp.br¹

Castro, J. N. C., nedilo@feg.unesp.br¹

¹UNESP-Univ Estadual Paulista, Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, 12.516-410, Guaratinguetá, SP

²Spectrum E. C., Rua George Eastman, 651, Apto. 31, Bl 06, Pq.Industrial, 12.237-640, São José dos Campos, SP

Abstract: *This work presents a thermo-sensitive device to control the rotation of the motor used in an axial free-flow fan, particularly, a general home fan with 40 cm diameter. In field research it was verified that this kind of fan, in a totality, uses the same type of alternate current motor control, (shaded-pole motor), connected to home electrical socket, 127 or 220 V_{ca}. They have manual on-off control, with three rotational speeds, to be selected according to motor coil, being minimum, medium and maximum. Therefore this standard control mode was an incentive and a motivation to develop an electronic-automatic speed control device using a temperature sensor and an electronic circuit adjusted for three levels of room temperature. In this device were used relays to provide automatic variation in motor axis rotation. In the device development was used a PIC-16F877 microcontroller instead of relays and through its programming the desired set control was implemented. Consequently this work presents to the market a currently non-existent alternative to rotation control of this kind of motor with the objective of improving the thermal comfort.*

Keywords: *thermal comfort, rotation control, temperature sensor*

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.