

SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO COM VELOCIDADE VARIÁVEL E ESTÁGIO DE ENTRADA DE ELEVADO FATOR DE POTÊNCIA

Carlos A. Canesin¹, Flávio A. S. Gonçalves¹, Eduardo Leandro¹, João O. P. Pinto²

¹UNESP – Campus Ilha Solteira
Av Brasil Centro, 56, Cx. Postal 31, CEP 15385-000, Ilha Solteira – SP, Brasil
Email: canesin@dee.feis.unesp.br, flavio@dee.feis.unesp.br, eduardo.leandro@electrolux.com.br

²UFMS – Campus Campo Grande
Cidade Universitária, Cx. Postal 549, CEP 79070-900. Campo Grande – MS, Brasil
Email: jpinto@nin.ufms.br

Resumo - Este trabalho propõe a análise e implementação de um novo sistema de acionamento eletrônico aplicado à sistemas de refrigeração. A proposta consiste em substituir no sistema de refrigeração convencional o motor monofásico de indução por um motor trifásico de indução, e o estágio de entrada convencional por um estágio apresentando correção ativa do fator de potência. O protótipo do sistema de refrigeração proposto é composto por um motor trifásico de 0,5HP, um compressor do tipo Bitzer IY (*Belt-Drive*) aberto, um inversor em ponte convencional e um pré-regulador boost monofásico. O novo sistema opera em conformidade com as restrições impostas pelas normas internacionais IECs (Harmônicas / Flicker / Interferências Eletromagnéticas) propiciando elevado rendimento, alto fator de potência e reduzidos níveis de interferências eletromagnéticas (IEM). Com o objetivo de verificar a viabilidade e performance da regulação da temperatura no sistema de refrigeração proposto o inversor de tensão do estágio de saída foi acionado por uma estratégia de controle convencional escalar tensão-frequência (V/f), e por uma estratégia de controle vetorial simplificada com orientação pelo estator.

Palavras-Chave – sistema de refrigeração com velocidade variável, retificador com elevado fator de potência, qualidade de energia.

VARIABLE SPEED REFRIGERATION SYSTEM WITH HIGH POWER FACTOR INPUT STAGE

Abstract – This paper is based on the analysis and implementation of a new drive system applied to refrigeration systems. The proposal is to replace in the conventional refrigeration system the single-phase induction motor by a three-phase induction motor, and the conventional input stage by a power factor correction input stage. The proposed refrigeration prototype uses a 0.5HP three-phase motor, an open (*Belt-Drive*) Bitzer IY type compressor, a conventional three-phase IGBT

bridge inverter, and a single-phase high-power-factor boost rectifier. The proposed system complies with the restrictions imposed by the IEC standards (Harmonic/Flicker/EMI-Electromagnetic Interference restrictions providing high efficiency, high power factor, reduced harmonic distortion in the input current and reduced electromagnetic interference. The digital controller for the output three-phase inverter stage has been developed using a conventional voltage-frequency control (scalar V/f control), and a simplified stator oriented Vector control, in order to verify the feasibility and performance of the proposed digital controls for continuous temperature control applied at the refrigerator prototype.

Keywords - variable speed refrigeration system, HPF rectifier, power quality.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas de refrigeração industriais podem ser encontrados em quase todas as regiões do nosso planeta. As principais aplicações para estes sistemas incluem: conservação de alimentos, absorção de calor em processos industriais, e diversas outras aplicações especiais nas indústrias de construção e bens de consumo. Entretanto, historicamente a indústria de refrigeração não tem demandado muita atenção na eficiência relacionada ao consumo de energia utilizado para alcançar os objetivos dos sistemas de refrigeração [1-3].

Especificamente no Brasil, os dispositivos de (R&AC) residenciais são responsáveis por 25% do montante total de energia consumida no país. Adicionalmente, considerando dados do Procel [4], a estrutura de consumo para o setor está distribuída em: 32% para refrigeração (refrigeradores e freezers), 26% para aquecimento de água, 25% para iluminação, e 18% para as demais aplicações.

Por outro lado, considerando somente as aplicações residenciais, o consumo demandado pelos refrigeradores e freezers representa cerca de 9% do total de energia consumida no Brasil. Nas aplicações comerciais, o consumo dos dispositivos de ar condicionado representa 20% do total deste setor, que equivale a 3% do consumo nacional. Enquanto, o setor industrial é responsável por consumir 46% do montante geral de energia produzida no Brasil, estando este consumo dividido em 20% com aquecimento, 6% em

Artigo submetido em 3/07/2008. Revisões em 16/09/2008 e 29/01/2009.
Aceito por recomendação do Editor Fernando Luiz M. Antunes.

refrigeração, 2% com iluminação, e o restante relacionado com outras aplicações.

Nas últimas décadas, os processos de pesquisa resultaram em progressos significativos relacionando metodologias de acionamento possibilitando a melhoria do rendimento nos sistemas R&AC. Assim, a diminuição dos custos aliada ao avanço tecnológico dos dispositivos de processamento digital permitiu a implementação de técnicas de controle de acionamento digitais impraticáveis no passado.

Nesse contexto, é evidente que um aumento na eficiência dos sistemas de R&AC pode consequentemente resultar em uma grande economia de energia. Adicionalmente, a melhoria do rendimento destes sistemas possui um impacto social e ambiental muito maior, devido à possibilidade da redução no consumo de combustíveis fósseis utilizados nos processos de geração de energia.

De maneira geral, a configuração de um sistema de refrigeração de até médio porte é composta por um motor de indução monofásico, acoplado a um capacitor de partida. Esta configuração convencional, com o controle da temperatura proposto na forma “liga-desliga”, requer um elevado conjugado de partida, refletindo em perdas ativas devido às elevadas correntes de “inrush”, e consequentemente um baixo fator de potência (0,5 até 0,8). Entretanto, apesar dos fatores negativos a forma de onda da corrente de entrada apresenta baixa distorção harmônica.

A operação do sistema de refrigeração depende dos estados termodinâmicos do refrigerante nos vários pontos do ciclo. As variações de estado incluem pressão no evaporador, condensador, superaquecimento na saída do evaporador e subresfriamento na saída do condensador. A adequada regulação destas variáveis termodinâmicas, controlando seus comportamentos dinâmicos podem levar a uma operação com alta performance e eficiência energética, a qual geralmente não é alcançada apenas com o controle do tipo “liga-desliga” [5].

A substituição do tradicional sistema de controle de temperatura “liga-desliga” por uma estratégia baseada no controle da velocidade do compressor pode refletir em economia de 11% no consumo de energia elétrica [6].

Assim, os sistemas de refrigeração convencionais, em função de suas características de operação, não conseguem satisfazer as restrições impostas por normas internacionais, como IEC 61000-3-2 e IEC 61000-3-4. Além disso, outros problemas podem ser verificados nestas configurações, por exemplo, as variações em baixa frequência do valor eficaz da fonte de alimentação (*flicker*), com limites impostos pela IEC 61000-3-3, afundamentos de tensão (*voltage sags*), e prováveis problemas de interferências eletromagnéticas (*EMI – Electromagnetic Interference*), em cargas próximas..

Portanto, muito esforço vem sendo demandado por pesquisadores para diminuir os fatores negativos relatados com o objetivo de minimizar a degradação da qualidade de energia na operação de diversas topologias de acionamentos elétricos, incluindo os sistemas de refrigeração [7-9].

Neste contexto, este trabalho propõe um sistema de refrigeração com velocidade variável capaz de apresentar elevado fator de potência melhorando a eficiência do processamento de energia, e regulando a temperatura no compartimento refrigerado.

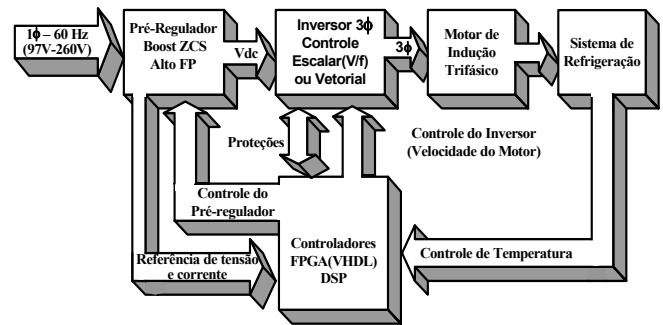


Fig. 1. Diagrama de blocos para o sistema de refrigeração com velocidade variável proposto.

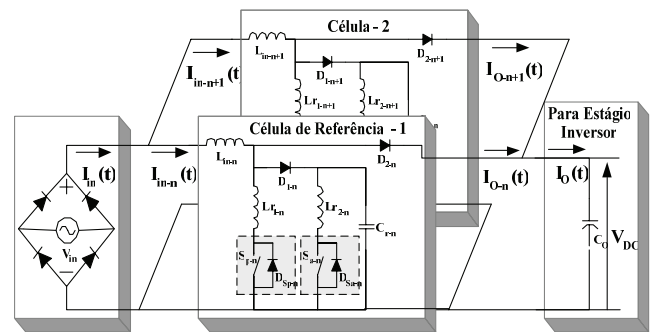


Fig. 2. Estágio de entrada composto pelo pré-regulador monofásico com duas células boost em “interleaving”.

II. SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO PROPOSTO

Com o objetivo de validar a estrutura proposta um sistema de refrigeração foi implementado, conforme Figura 1.

O estágio de entrada do sistema proposto, ilustrado na Figura 2, consiste de um pré-regulador monofásico de 1kW composto por duas células boost em “interleaving”, operando no modo de condução crítica, utilizando técnicas de comutação suave e controlado através de um dispositivo FPGA (*Field Programmable Gate Array*).

A técnica de comutação suave aplicada ao estágio de entrada está baseada na utilização de células do tipo ZCS (*zero-current-switching*). Esta célula propicia para os interruptores principais a entrada em condução em condições de corrente nula (*ZC – zero current*) e bloqueio em condições de tensão e corrente nulas (*ZCZV - zero-current-zero-voltage*), e, ao mesmo tempo condições de tensão nula na entrada em condução e corrente nula no bloqueio dos diodos boost [10].

Em função das células boost operarem no modo de condução crítico, as desvantagens relacionadas com a recuperação reversa nos diodos boost quando da operação no modo de condução contínua (perdas adicionais, e interferências eletromagnéticas - IEM) são minimizadas [10-13].

Para as condições de potência envolvidas nesta análise, o pré-regulador do estágio de entrada é uma estrutura monofásica. Entretanto, para aplicações em potências mais elevadas, a técnica proposta pode ser facilmente adaptada, considerando estágios de entrada monofásicos ou trifásicos.

O estágio de saída consiste de um inversor em ponte trifásico convencional a IGBTs (*VSI-Voltage Source Inverter*) de 0,75kVA, controlado por um DSP (*Digital Signal Processor*), e um compressor do tipo aberto, Bitzer IV, acionado por um motor trifásico de 0,5HP acoplado por uma correia. As leis de controle deste estágio foram implementadas digitalmente usando um DSP TMS320F2812, com o objetivo de impor o controle de velocidade desejado para o motor de indução trifásico regulando a temperatura do protótipo de refrigeração desenvolvido, através do acionamento do compressor aberto (*Belt-drive*).

III. ESTRATÉGIA DE CONTROLE DIGITAL

As leis de controle digital para o estágio de entrada foram desenvolvidas empregando a linguagem de descrição de hardware VHDL (*VHSIC Hardware Description Language*), e implementadas usando o dispositivo FPGA da XC2S200E-SpartanII-E/Xilinx, propiciando de maneira efetiva o modo de condução crítico para as duas células boost em “*interleaving*”, e a regulação da tensão de saída através de um laço de realimentação em malha fechada.

As metodologias de controle digital baseadas em dispositivos lógicos programáveis, como os FPGAs, podem fazer uso das técnicas modernas de projetos digitais, onde o emprego de uma linguagem de descrição de hardware, como VHDL permite a descrição de sistemas digitais utilizando seus modelos comportamentais [14-17].

A Figura 3 mostra o algoritmo de controle para o pré-regulador boost *interleaved* do estágio de entrada. O controle por valores de pico foi utilizado para determinar os instantes

de comando para o bloqueio dos interruptores principais das células boost. Assim, quando a corrente através do interruptor principal alcança um nível de referência determinado, o sinal de comando de gate é configurado para nível lógico baixo.

A estratégia de regulação de tensão empregou um compensador do tipo proporcional-integral (PI) discreto com frequência de amostragem de 50kHz, expresso por (1).

$$G_c(z) = \frac{5.7318 - 5.7304 \cdot z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (1)$$

As leis de controle digital para o estágio de saída, inversor em ponte trifásico convencional a IGBTs, foram desenvolvidas utilizando o ambiente de desenvolvimento Simulink/MatLab, posteriormente codificadas em linguagem de programação (C), e implementadas no DSP TMS320F2812/Texas Instruments.

A regulação da temperatura foi realizada através da variação da velocidade do compressor. Neste sentido, duas estratégias de controle de velocidade do motor de indução trifásico foram analisadas. A primeira é baseada no controle tensão-freqüência (V/f), ou seja, controle escalar clássico, e a segunda será baseada no controle vetorial.

A Figura 4.a mostra o diagrama de blocos do estágio de saída considerando o controle do motor de indução trifásico sendo do tipo escalar V/f, o subsistema de potência, e o subsistema de processamento de sinais. O subsistema de potência é composto por: um barramento de tensão CC (V_{dc}), que é gerado pelo pré-retificador monofásico com elevado fator de potência, inversor de tensão PWM trifásico, e motor de indução trifásico.

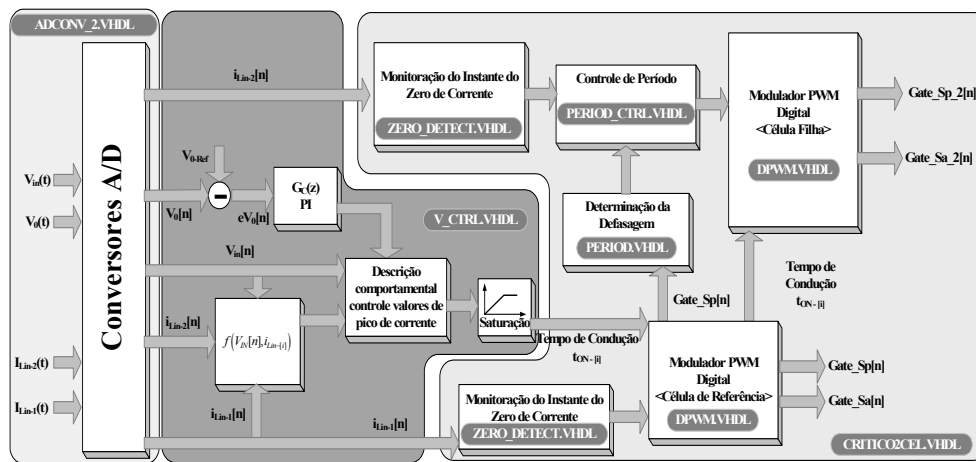


Fig. 3. Diagrama de blocos do algoritmo de controle para o estágio de entrada, pré-regulador boost *interleaved*.

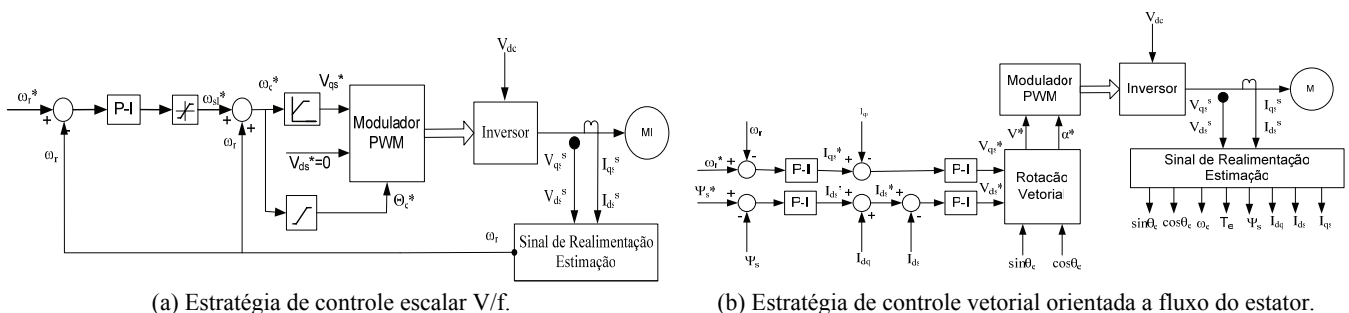


Fig 4. Diagrama de blocos do algoritmo de controle para o estágio de saída, inversor de tensão em ponte trifásico convencional a IGBTs.

Em função da indutância do motor, o usual filtro passa-baixa não é requerido nos terminais de saída do inversor, pois esta é capaz de atenuar inerentemente as componentes de alta frequência presentes nas tensões de saída do inversor. Os sinais PWM, gerados pelo modulador PWM são utilizados para controlar a tensão de alimentação propiciada pelo inversor.

O subsistema de processamento de sinais responsável por realizar o controle vetorial, é composto por: estimador de sinais de realimentação, que utiliza as tensões e correntes nos terminais do motor para estimar a velocidade do rotor, e alimentá-la no laço de controle de velocidade, controlador de velocidade do tipo PI, modulador PWM.

A Figura 4.b mostra o diagrama de blocos do estágio de saída considerando a estratégia de controle de velocidade do motor de indução trifásico sendo do tipo vetorial, com fluxo orientado pelo estator.

O subsistema de potência permanece o mesmo descrito anteriormente. Entretanto, o subsistema de processamento de sinais se torna um pouco mais complexo, pois o estimador de sinais de realimentação agora utiliza as tensões e correntes nos terminais do motor para estimar todos os sinais de entrada necessários pelos controladores para efetuar a orientação vetorial da tensão.

Os controladores de velocidade e fluxo no estator, localizados em laços externos, também fazem parte do subsistema de processamento de sinais. Especificamente, a malha de controle de velocidade possui compensadores de corrente em seu laço interior, e o estágio de saída da malha de controle do fluxo no estator é somada com a corrente de compensação de desacoplamento para estabelecer o comando de corrente direta.

As entradas do modulador PWM (V^* e α^*) são geradas com o auxílio do ângulo do vetor unitário efetuando a rotação dos sinais provenientes dos laços de controle de corrente síncrona (v_{ds}^* e v_{qs}^*). Por fim, de maneira análoga ao arranjo de controle escalar V/f existe um modulador PWM criando os sinais de controle para os interruptores do inversor.

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAL

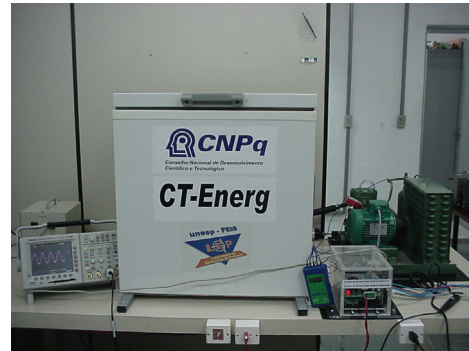
Considerando a utilização de um arranjo de refrigeração convencional com os parâmetros descritos na Tabela I, a Figura 5 ilustra o sistema de refrigeração com velocidade variável proposto.

Em concordância com os conceitos da termodinâmica, o arranjo mais simples para modelar um ciclo de compressão de um fluido refrigerante compreende quatro componentes (compressor, condensador, válvula de expansão, e evaporador), como mostra a Figura 6.

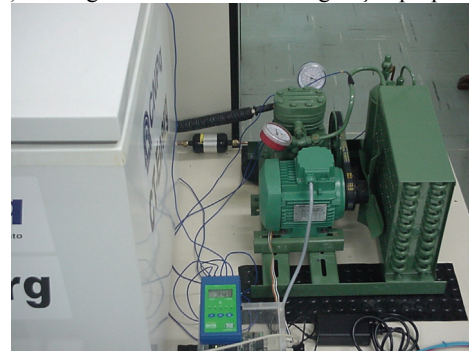
O ciclo tem seu início com o fluido refrigerante adentrando ao compressor na forma de vapor superaquecido, e com baixa pressão. O fluido é comprimido para alta pressão pelo compressor e entra no condensador. Em seguida, considerando a existência de ventiladores conduzindo fluxo de ar através do condensador, o fluido refrigerante em mais alta pressão e temperatura, que as condições do ambiente, passa por um processo de condensação à medida que o calor é transferido para o ar.

TABELA I
PARÂMETROS DO ARRANJO DE REFRIGERAÇÃO CONVENCIONAL.

Parâmetro	Especificação
Largura do ambiente controlado	0,65m
Comprimento do ambiente controlado	0,65m
Altura do ambiente controlado	0,62m
Fluido refrigerante utilizado	R22
Massa de fluido refrigerante	1600g
Comprimento do evaporador	26m
Comprimento do condensador	11m



(a) Visão geral do sistema de refrigeração proposto.



(b) Detalhes – motor de indução, compressor, e sensores de temperatura/pressão.

Fig. 5. Sistema de refrigeração com velocidade variável proposto.

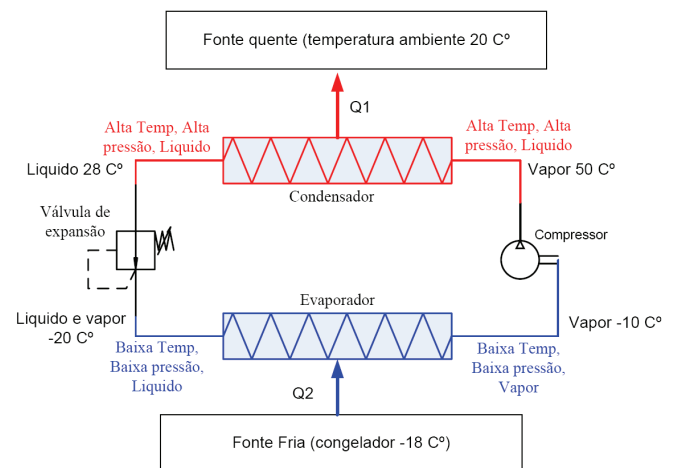


Fig. 6. Diagrama do sistema de refrigeração a vapor.

Ao deixar o condensador como líquido sub-resfriado em alta pressão, o mesmo passa por um dispositivo de expansão (válvula de expansão). Na saída da válvula de expansão o fluido se apresenta em duas fases, na forma de uma mistura líquido-vapor à baixa pressão. Esta mistura inicia o processo de entrada no evaporador, possuindo pressão e temperatura mais baixa do que as condições do ambiente a ser resfriado, o

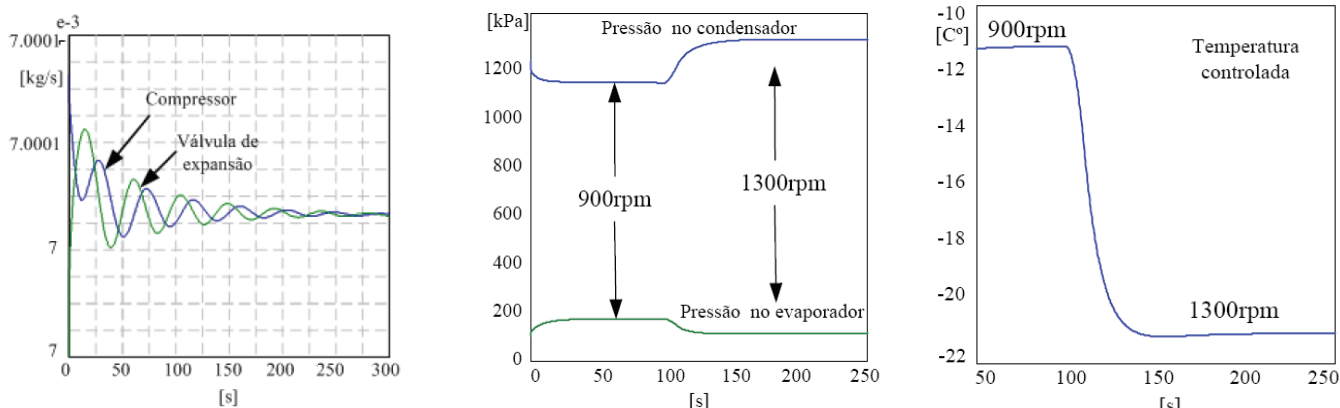
calor é transferido para o fluido, que evapora. Finalmente, o refrigerante deixa o evaporador como vapor superaquecido e entra novamente no compressor, completando um ciclo.

Simulações computacionais contemplando o sistema de refrigeração proposto foram realizadas empregando modelos termodinâmicos baseados nas abordagens propostas por [1-3]. Os resultados do modelo para o sistema de refrigeração descrito na Tabela I utilizando R22 como fluido refrigerante são apresentados na Figura 10.

A Figura 7.a mostra a comparação das evoluções temporais da vazão mássica do fluido frigorífico imposto pelo compressor e pela válvula de expansão ratificando a convergência da modelagem termodinâmica utilizada. A evolução temporal da pressão do fluido refrigerante no evaporador e no condensador, e da temperatura no ambiente controlado devido a variações na velocidade do compressor são apresentadas nas Figuras 7.b e 7.c, respectivamente.

Considerando que a velocidade do compressor determina a modificação da temperatura no ambiente controlado, como constatado na Figura 7.c, e, que a resposta dinâmica do sistema de refrigeração com relação à temperatura é muito lenta, o algoritmo proposto para a regulação da temperatura foi desenvolvido baseado no diagrama de blocos mostrado na Figura 8.

Os resultados de simulação obtidos para o sistema de controle proposto na Figura 8, considerando a operação usando controle escalar (V/f) em malha fechada são apresentados na Figura 9. A Figura 9.c mostra que para diferentes valores de velocidade do compressor ocorre uma variação no valor de regime da temperatura demonstrando que a estratégia escalar empregada no algoritmo de variação de velocidade é exequível e suficiente para garantir a obtenção do controle desejado da temperatura dentro do refrigerador.



(a) Evolução da vazão mássica do compressor e da válvula de expansão. (b) Pressão no evaporador e no condensador. (c) Temperatura no ambiente controlado.

Fig. 7. Resultados de simulação para o sistema de refrigeração proposto.

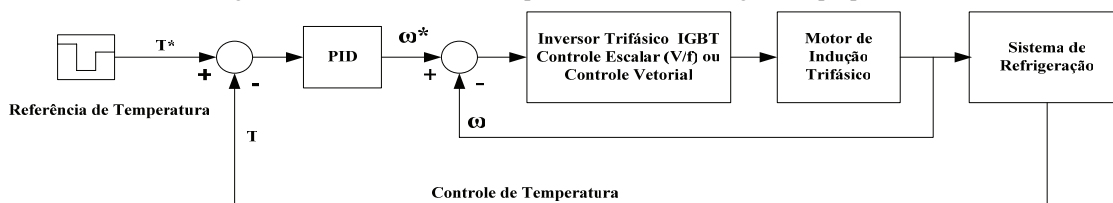


Fig. 8. Diagrama de blocos da estratégia de controle para impor o valor desejado da temperatura no sistema de refrigeração, considerando a operação com velocidade variável do motor de indução.

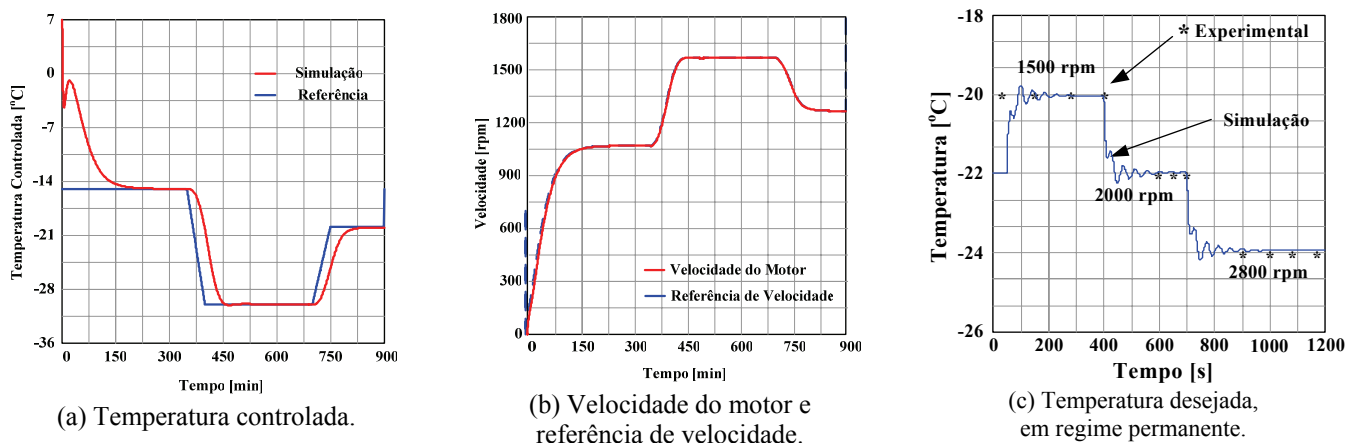


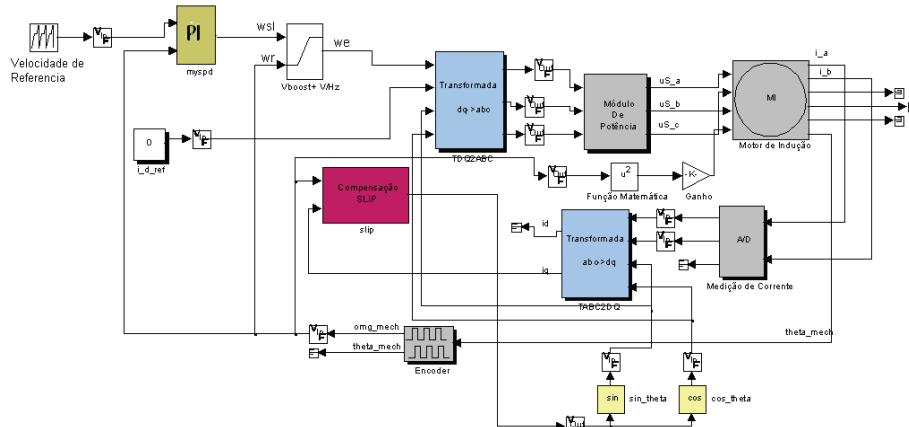
Fig. 9. Resultados para o controle proposto, considerando a estratégia escalar V/f.

A Figura 10 ilustra como as técnicas de controle escalar (V/f) e vetorial foram implementadas no ambiente de desenvolvimento Simulink/Matlab.

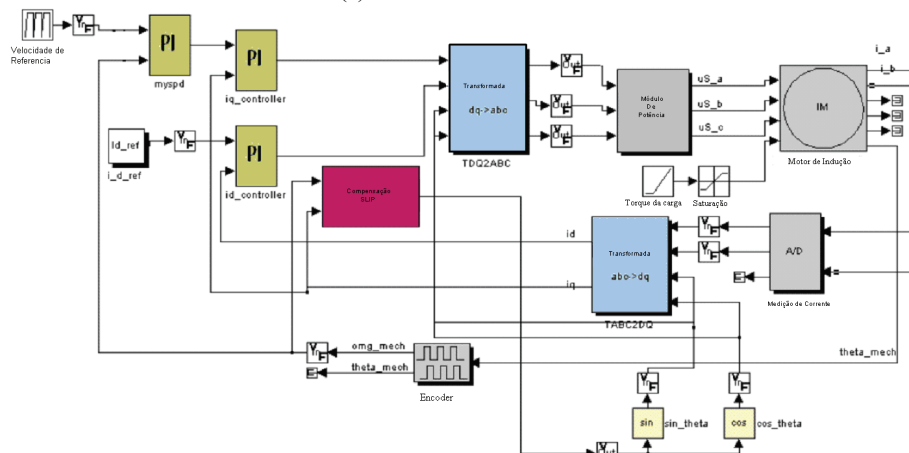
Os resultados experimentais para o sistema de refrigeração proposto operando com as técnicas de controle escalar e vetorial (orientação pelo estator) são apresentados na Figura 11. Adicionalmente, a Figura 11.c mostra a energia consumida pelo sistema de refrigeração considerando o acionamento convencional por um motor monofásico, e o acionamento proposto por um motor trifásico. A análise dos resultados ratifica que a energia consumida com o arranjo

motor monofásico é aproximadamente 19% maior. O comportamento do consumo foi registrado através de um analisador de energia Yokogawa WT230, considerando as mesmas condições iniciais/finais de temperatura do ambiente controlado.

Os valores dos parâmetros dos controladores PI utilizados nos controles escalar e vetorial foram determinados empregando as metodologias de projeto convencionais, e, estão descritos na Tabela II, considerando a frequência de amostragem de 10 kHz.

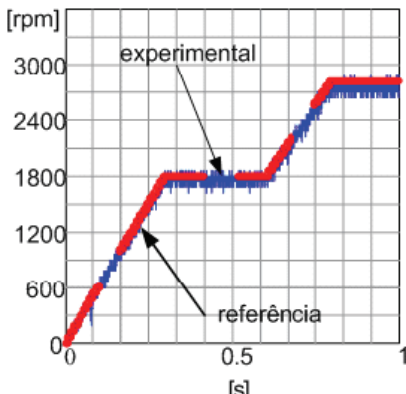


(a) Controle escalar V/f.

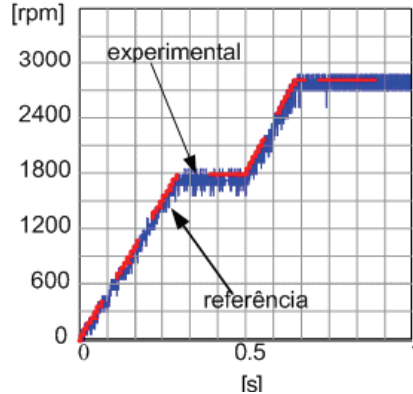


(b) Controle vetorial (orientada pelo fluxo do estator).

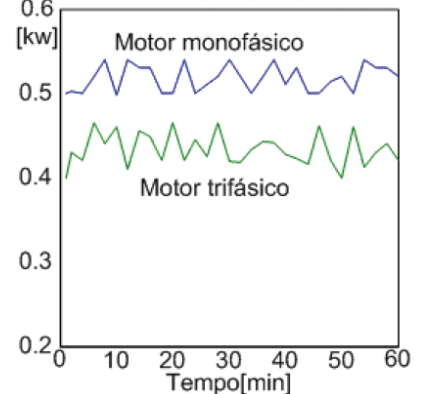
Fig. 10. Estratégias de controle implementadas no ambiente de desenvolvimento Simulink/Matlab.



(a) Estratégia de controle escalar V/f.



(b) Estratégia de controle vetorial orientada a fluxo do estator.



(c) Comparação do consumo de energia entre o motor monofásico e o trifásico.

Fig. 11. Resultados experimentais, considerando as estratégias de controle propostas (escalar e vetorial), e a temperatura desejada em regime permanente.

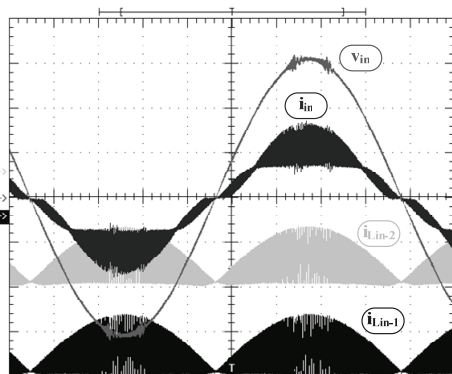
TABELA II
PARÂMETROS DOS COMPENSADORES PI EMPREGADOS NOS CONTROLES DE VELOCIDADE (ESCALAR E VETORIAL).

Parâmetro	Especificação
Controle Escalar	
Ki	9
Kp	30000
Controle Vetorial	
Ki (Velocidade)	50
Kp (Velocidade)	30000
Ki (Componente Id)	1,4
Kp (Componente Id)	0,4
Ki (Componente Iq)	1,4
Kp (Componente Iq)	0,15

TABELA III
PARÂMETROS DO ESTÁGIO DE ENTRADA, PRÉ-REGULADOR BOOST "INTERLEAVED" COM ELEVADO FATOR DE POTÊNCIA.

Dados de Entrada e Saída		Parâmetros do Circuito	
Parâmetro	Especificação	Parâmetro	Especificação
$V_{in[eficaz]}$	220 V	S_{P1-i}	HGTP12N60A4D
V_{DC}	400 V	S_{A1-i}	HGTP7N60A4D
P_o	1 kW	D_{1-i}	RHRP860
$f_s[V_{in}=220V]$	50 kHz	D_{2-i}	RHRP8100
Células (i)	1, 2	L_{in-i}	428,5µH
Ângulo [rad]	$\pi/2$	L_{r1-i}	28,6µH
		L_{r2-i}	20 µH
		C_{r-i}	10 nF
		C_o	390 µF

Onde: [i] é o número da célula boost ZCS interleaved



V_{in} : 100V/div; i_{in} - i_{Lin-1} - i_{Lin-2} : 5A/div, 2ms/div.

Fig. 12. Formas de onda de tensão e corrente de entrada, e das correntes através dos indutores das células boost do estágio de entrada, considerando um período da rede CA e carga nominal.

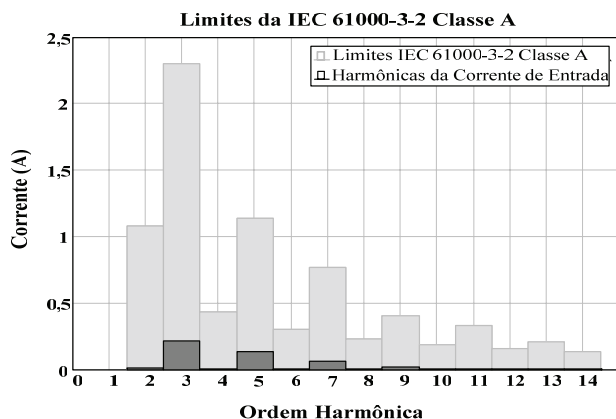


Fig. 13. Amplitudes das componentes harmônicas da forma de onda de corrente do estágio de entrada, e limites da norma IEC61000-3-2 Classe A.

Desta forma, o sistema de refrigeração proposto monitora as variações de temperatura no ambiente controlado, e ajusta seu funcionamento em função das necessidades. A operação ocorre de maneira contínua fazendo com que sejam atingidas as pressões ótimas de funcionamento, eliminando a necessidade de liga-desliga do compressor. Os limites de operação inferior e superior de velocidade são impostos pela capacidade de lubrificação do compressor, variando entre 800 e 2700 RPM no sistema proposto.

Conforme a característica do tipo de aplicação (residencial, comercial ou industrial) a modificação da estratégia de acionamento pode levar a uma economia de energia de até 30%, além da considerável diminuição dos níveis de ruídos proporcionada por partidas mais suaves.

Por fim, os parâmetros de projeto e a especificação dos componentes para o pré-regulador com elevado fator de potência proposto na Figura 2 são apresentados na Tabela III.

O pré-regulador do estágio de entrada foi projetado para potência nominal de 1kW, sendo composto por duas células boost em *interleaved* operando no modo de condução crítico, e com circuitos auxiliares para propiciar a comutação suave nos interruptores.

Assim, o estágio de entrada proposto é capaz de reduzir as perdas de chaveamento, incluindo as perdas relacionadas com a recuperação reversa do diodo boost, porque todos os semicondutores utilizados na estrutura apresentam seus processos de comutação de maneira não dissipativa.

As formas de onda da tensão e corrente requeridas da rede de alimentação pelo estágio de entrada proposto, e as formas de onda das correntes através dos indutores nas células boost, considerando carga nominal são apresentadas na Figura 12.

O espectro harmônico da forma de onda da corrente de entrada demonstra que as componentes de ordem ímpar (terceira, quinta, sétima e nona ordens) apresentam maior relevância, e que as intensidades das componentes harmônicas possuem amplitudes bem abaixo dos limites impostos pela IEC61000-3-2 Classe A, como mostra a Figura 13.

Assim, o fator de potência registrado experimentalmente para a condição de carga nominal foi de 0,989, e a distorção harmônica total (DHT) em aproximadamente 5,33%.

Adicionalmente, o emprego da técnica de "interleaving" na operação das células de potência que compõe o estágio retificador de entrada propicia outras características vantajosas, tais como: a redução da ondulação de corrente de entrada e da tensão de saída, o emprego de semicondutores com menor custo devido aos baixos níveis de esforços, menor volume do filtro de IEM em função da eliminação da descontinuidade na corrente de entrada.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um novo sistema de acionamento elétrico aplicado a um sistema refrigeração com velocidade variável para controle de temperatura, e apresentando operação em conformidade com a norma IEC 61000-3-2.

Os resultados experimentais comprovam que o fator de potência é próximo do unitário e a distorção harmônica presente na forma de onda da corrente de entrada está em

conformidade com as rígidas restrições impostas pela norma IEC 61000-3-2 para equipamentos da Classe A.

Os resultados de simulação e experimentais para o controle escalar (V/f) demonstram que a estratégia proposta é realizável, e suficientemente capaz de propiciar o controle da temperatura no sistema de refrigeração proposto através da variação da velocidade do compressor tipo Bitzer IY em função do acionamento do motor de indução trifásico.

A estratégia de controle vetorial mostrou-se capaz de propiciar todas as dinâmicas de variações de velocidade necessárias para a efetivação do controle da temperatura em sistemas de refrigeração. Entretanto, o comportamento dinâmico convencional apresentado pelo sistema de refrigeração em análise é lento no tempo, como constatado nas Figuras 7, e 9, indicando que a utilização do controle vetorial em aplicações deste tipo não seria uma exigência considerada necessária.

Os resultados desta pesquisa podem ser aprimorados, melhorando as vantagens do sistema de refrigeração proposto, através da utilização de uma válvula de expansão eletrônica, com o objetivo de controlar o ciclo da compressão termodinâmica, e a utilização de motores do tipo PM (*Permanent Magnet*).

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq por ter fomentado este trabalho de pesquisa através do CT-Energ/CNPq.

REFERÊNCIAS

- [1] K. A. Manske, "Performance optimization of industrial refrigeration systems", *Dissertação de Mestrado (Master Thesis of Science)*, University of Wisconsin-Madison, p. 166, 1999.
- [2] B. P. Rasmussen, "Control-oriented modeling of transcritical vapor compression systems", *Dissertação de Mestrado (Master Thesis of Science)*, University of Illinois at Urbana-Champaign, p. 207, 2002.
- [3] G. A. Florides, S. A. Kalogirou, S. A. Tassou, "Energy consumption Analysis of a typical house", in *Proc. of Mediterranean Electrotechnical Conference*, vol.3, pp. 1165-1168, Maio 2000.
- [4] S. M. Pena, "Sistemas de ar condicionado e refrigeração - PROCEL", Relatório Técnico Eletrobrás, 103p, 2002.
- [5] X. He, "Dynamic modeling and multivariable control of vapor compression cycles in air conditioning systems", *Tese de Doutorado (Ph.D. Dissertation)*, Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [6] Vargas, J. V.C., Parise, J. A.R. "Simulation in transient regime of a heat pump with closed-loop and on-off control", *Int. J. Refrigeration*, Vol. 18, No. 4, pp. 235-243, 1995;
- [7] X. He, S. Liu, H. Asada, "Modeling of vapor compression cycles for multivariable feedback control of HVAC systems", in *Proc. Of ASME J. Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol.119, pp.183-191, Junho 1997.
- [8] S. Kwak, H. A. Toliyat, "Design and rating comparisons of PWM voltage source rectifiers and active power filters for AC drives with unity power factor", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 5, pp. 1133-1142, Setembro 2005.
- [9] F. A. S. Gonçalves, C. A. Canesin, "Single-phase high power-factor boost ZCS pre-regulator operating in critical conduction mode", in *Proc. of IEEE International Symposium on Industrial Electronics Conference*, vol. 2, pp. 746-751, Junho 2003.
- [10] T. Ishii, Y. Mizutani, "Power factor correction using interleaving technique for critical mode switching converters", in *Proc. of IEEE Applied Power Electronics Conference*, pp. 404-410, Fevereiro 1994.
- [11] P. Wong, F. C. Lee, "Interleaved to reduce reverse recovery loss in power factor correction circuits", in *Proc. of IEEE Industry Applications Society Conference*, vol. 4, pp. 2311-2316, Outubro 2000.
- [12] B. A. Miwa, D. M. Otten, M. F. Schlecht, "High efficiency power factor correction using interleaving techniques", in *Proc. Of IEEE Applied Power Electronics Conference*, pp. 557-568, Fevereiro 1992.
- [13] P. Zumel, A. de Castro, O. Garcia, T. Riesgo, J. Uceda, "Concurrent and simple digital controller of an AC/DC converter with power factor correction", in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 1, pp. 334-343, Janeiro 2003.
- [14] A. Prodic, A., C. Jingquan Chen, D. Maksimovic, R. W. Erickson, "Self-tuning digitally controlled low-harmonic rectifier having fast dynamic response", in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 1, pp. 420-428, Janeiro 2003.
- [15] G. Spiazzi, P. Mattavelli, L. Rossetto, "Power factor Pre-Regulators with improved dynamic response", in *Proc. of IEEE Power Electronics Specialists Conference*, vol. 1, pp. 150-156, Junho 1995.
- [16] T. Riesgo, Y. Torroja, E. De la Torre, "Design methodologies based on hardware description languages", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 1, pp.3-11, Fevereiro 1999.

DADOS BIOGRÁFICOS

Carlos Alberto Canesin, nascido em 1961, é engenheiro eletricitista (1984) pela Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), mestre (1990) e doutor (1996) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) – Instituto de Eletrônica de Potência (INEP), Florianópolis (SC).

Ele foi editor geral da Revista Eletrônica de Potência (gestão 2003-2004), ex-presidente da SOBRAEP – Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (gestão 11/2004 – 10/2006). Atualmente é professor titular do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UNESP-FEIS.

É editor associado da IEEE Transactions on Power Electronics. Suas áreas de interesse incluem qualidade da energia elétrica, técnicas de comutação não-dissipativa, conversores CC-CC, retificadores e inversores, fontes de alimentação chaveadas, reatores para iluminação e técnicas de correção ativa do fator de potência.

Flávio Alessandro Serrão Gonçalves, nascido em Porto Velho (RO) em 1975, é engenheiro eletricista (1998), mestre (2001) e doutor (2005) em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista – UNESP-FEIS, em Ilha Solteira (SP).

Atualmente é professor da UNESP-FEIS, e trabalha como pesquisador associado ao Laboratório de Eletrônica de Potência (LEP). Suas áreas de interesse incluem qualidade da energia elétrica, correção ativa do fator de potência, técnicas de associação para conversores, técnicas de comutação não dissipativa, conversores CC-CC e CA-CC, inversores, sistemas de controle digital (FPGA, DSP, Microcontroladores, J2ME), síntese de sistemas eletrônicos empregando linguagem de descrição de hardware (VHDL/Verilog), e plataformas distribuídas para E-Learning em eletrônica de potência.

Dr. Gonçalves é membro da SOBRAEP desde 1999.

Eduardo Leandro, nascido em Anápolis (GO) em 1979, possui graduação (2003) e mestrado (2006) em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia de Ilha em Solteira.

Atualmente trabalha como engenheiro de desenvolvimento de produto na Electrolux do Brasil, pertence ao grupo de desenvolvimento de lavadoras *Competence Center*. Tem experiência na área de engenharia elétrica, com ênfase em sistemas elétricos de potência, atuando principalmente no controle e acionamento de máquinas elétricas.

João Onofre Pereira Pinto, nasceu em 1966 em Valparaíso (SP), Brasil. Engenheiro Eletricista pela Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil, em 1990. Mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, em 1993, e Ph.D. pela The University of Tennessee, Knoxville, TN, EUA em 2001.

Atualmente é professor da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Brasil, onde ocupa o cargo de coordenador do programa pós-graduação em engenharia elétrica. Pesquisador do CNPq, suas áreas de interesse incluem mineração de dados, sistema de suporte a decisão, processamento de sinais, aplicações de redes neurais artificiais, lógica nebulosa, algoritmos genéticos e wavelets em eletrônica de potência, técnicas PWM, controle e acionamentos de máquinas elétricas.