



SCE-008

21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

STE II - SESSÃO TÉCNICA ESPECIAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS ALIMENTADOS POR INVERSOR PWM

Ângelo José Junqueira Rezek
EFEI
Antônio Tadeu Lyrio Almeida
EFEI
José Antônio Cortez
EFEI

Selênio Rocha Silva
UFMG
Tales Caetano Goulart
CEMIG

RESUMO

O trabalho se propõe a analisar quantitativamente o comportamento do rendimento de um motor de indução trifásico (MIT) alimentado por um inversor PWM (Pulse Width Modulation – modulação por largura de pulso), comparando com o rendimento obtido a partir da utilização de um sistema de alimentação que propicia forma de onda senoidal pura.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência de motores elétricos; Comparação de desempenho, Acionamento de MIT's, Inversor PWM.

1.0 INTRODUÇÃO

Sabe-se que os motores elétricos respondem por mais da metade do consumo de energia elétrica mundial e que, dentre estes, os motores de indução trifásicos (MIT's) são os mais utilizados na indústria. No Brasil, esta afirmação também se verifica e a utilização de inversores de frequência PWM, operando nos modos de controle escalar e vetorial, para acionamento de MIT's é cada vez mais difundida. A metodologia desenvolvida neste trabalho agrega uma avaliação eminentemente experimental através de ensaios em um motor de indução trifásico alimentado a frequência variável. Utilizou-se, para fins de comparação, as formas de alimentação senoidal pura e PWM, sendo esta última nos modos de operação escalar e vetorial. Assim, a comparação de desempenho entre os próprios modos de parametrização do inversor foi também obtida. Na implementação do modo de alimentação senoidal foi utilizado um conversor de frequência rotativo, constituído por um motor de corrente contínua acionando um alternador trifásico de forma a permitir o controle independente de frequência e tensão gerada. O conversor rotativo, de potência várias vezes superior à da máquina ensaiada, não apresentou influência sensível detectável ao seu carregamento. Portanto, o MIT foi alimentado por um

sistema de tensões senoidais (conversor rotativo) e por um sistema de tensões PWM (inversor de frequência). O acionamento Senoidal permitiu, tal como o inversor de frequência, a aplicação no motor de tensões e frequências variáveis, mantendo-se constante a relação tensão-frequência. Para as medições foi utilizado o analisador trifásico VOLTECH PM-300, que permite a aquisição das formas de onda instantâneas de tensão e corrente fornecidas na entrada do sistema de acionamento sob teste. Os resultados obtidos indicam um comportamento complexo quando a máquina encontra-se sob alimentação PWM, o que sugere um impacto decisivo dos harmônicos temporais sobre o desempenho do motor.

2.0 ACIONAMENTO PWM

2.1 – Considerações iniciais

Os modernos sistemas de acionamento eletrônico apresentam tecnologia em contínua evolução, sendo construídos a partir de dispositivos semicondutores de potência e circuitos eletrônicos digitais. A motivação inicial para o seu uso foi a possibilidade de exercer controle de velocidade, comparável aos antigos conversores rotativos, com sensível redução de custos. A disseminação destes sistemas nos últimos 20 anos cresceu exponencialmente, partindo-se de retificadores controlados de silício (SCR), chaveados a 300 Hz, para tiristores gatilhados por corrente (GTO) e, mais recentemente, o transistor bipolar de porta isolada (IGBT), que opera com frequências de chaveamento da ordem de 20 kHz. Estas constantes evoluções influíram decisivamente no nível de desgaste imposto aos enrolamentos dos motores controlados, tendo em conta as elevadas frequências de chaveamento a que ficaram submetidos.

As perdas no núcleo magnético dos motores elétricos associadas à componente fundamental do fluxo são normalmente identificadas com as perdas por correntes induzidas e por histerese, sendo que as

perdas magnéticas totais são determinadas através da soma destes dois termos. No entanto, esta modelagem apresenta limitações no que se refere à descrição das perdas no circuito magnético de máquinas elétricas rotativas. Em motores elétricos, harmônicos espaciais de fluxo produzem taxas de variação da densidade de fluxo (dB/dt) elevadas, o que afeta significativamente as perdas por correntes induzidas. Outro fator que aumenta as perdas por correntes induzidas é que não é possível confinar totalmente o fluxo ao plano das laminações. O processo de estampagem das chapas e esforços localizados nas laminações também dão origem a uma elevação das perdas, que pode afetar a eficiência de um motor de indução de baixa potência em até 2,5%. Na modelagem das perdas de motores elétricos, é importante ainda incluir o fato de que as superfícies do rotor e do estator não são uniformes, devido aos *slots* onde são colocados os enrolamentos, o que implica em um *ripple* no fluxo de entreferro e perdas magnéticas na superfície do rotor e estator.

A alimentação de motores elétricos através de modernos inversores de frequência operando com modulação de largura de pulso tem implicações adicionais àquelas apontadas no parágrafo anterior. A principal característica desta forma de alimentação é uma forma de onda de tensão não-senoidal, o que implica na presença de componentes harmônicas nas correntes de estator que dão origem a componentes de fluxo de frequência elevada no entreferro do motor. Estas componentes harmônicas de fluxo implicam em uma elevação das perdas no núcleo e pulsação do conjugado motor. É importante apontar aqui que questões tecnológicas implicam na presença de componentes espectrais de amplitude significativa nas correntes do motor, em adição à componente fundamental, que se concentram em torno da frequência de chaveamento do inversor e suas harmônicas ou nas harmônicas de baixa ordem da componente fundamental da corrente. Outro aspecto relevante está relacionado com a elevada taxa de variação da tensão de saída observada nos modernos inversores de frequência. Estas taxas de variação de tensão superam 1000 V/μs e dão origem a componentes de corrente acopladas capacitivamente que fluem radialmente pelo núcleo de estator e rotor e pela carcaça do motor.

2.2 - Inversor PWM

A Figura 1 ilustra os blocos funcionais básicos de um inversor PWM típico. A unidade retificadora transforma tensão alternada em tensão contínua e faz o interfaceamento do equipamento PWM com a rede de alimentação. A unidade inversora converte tensão contínua em alternada de amplitude e frequência variáveis. A tensão de saída da unidade inversora é alternada do tipo pulsada retangular, com amplitude de pulso fixa e largura modulada. O equipamento PWM utilizado foi o Simovert Master Control - AC/AC – Siemens – Tipo A. Este inversor pode ser operado no modo Standard ou com controle vetorial – modo Expert. Após a seleção de uma das

duas opções, a parametrização consiste em seguir os passos constantes da rotina selecionada, inserindo os dados do motor e da rede de alimentação. No modo Expert se processa a auto identificação do motor feita pelo inversor através da realização dos seguintes ensaios:

- de rotor bloqueado (feito com corrente nominal);
- de rotor livre;
- de otimização do regulador de velocidade.

Inicialmente, a parametrização adotada para o acionamento PWM foi a opção Standard que opera segundo uma relação Volts/Hertz constante e com compensação de queda (RI) para baixas frequências. Em seqüência, o motor foi ensaiado adotando-se o modo Expert, utilizando o método indireto, ou seja, com estimação de velocidade e fluxo. A frequência de chaveamento adotada para o inversor foi de 8 kHz, sendo esta uma frequência intermediária da faixa admissível de 3,4 – 16 kHz. Foge, portanto, aos objetivos deste trabalho, avaliar o impacto das distorções de corrente oriundas da influência do tempo morto sobre a frequência de chaveamento do conversor.

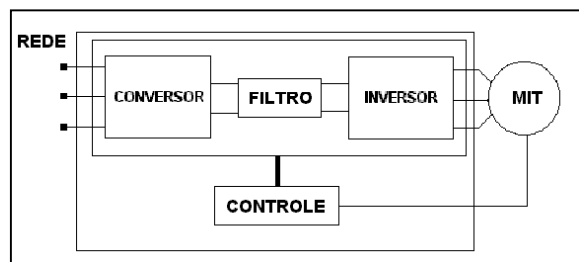


FIGURA 1: Diagrama básico do inversor PWM

3.0 ACIONAMENTO SENOIDAL

3.1 – Considerações iniciais

A alimentação senoidal foi viabilizada a partir da utilização de um conversor eletromecânico de 35 kVA, composto por um motor de corrente contínua mecanicamente interligado a um gerador síncrono trifásico. A montagem foi feita de modo a se obter alimentação senoidal pura do MIT em tensões e frequências variáveis em função, respectivamente, das variações na excitação do gerador síncrono e na velocidade do motor de corrente contínua. O circuito de excitação do gerador síncrono foi constituído por um retificador não-controlado que recebe alimentação em corrente alternada através de um varivolt, de forma a permitir a variação da corrente de campo do gerador e a conseqüente variação da tensão imposta ao motor de indução. O motor de corrente contínua foi excitado através de uma fonte fixa, mantendo-se a corrente de excitação em um valor constante. Um conversor controlado (ponte a tiristores) foi conectado ao circuito de armadura do motor de corrente contínua e uma resistência de 22 [Ω], utilizada apenas na partida do motor, foi inserida em série com o circuito de armadura. A variação de

velocidade do motor e conseqüentemente a variação de freqüência da tensão gerada pela máquina síncrona foi obtida através da variação do ângulo de disparo dos tiristores. A Figura 2 ilustra o esquema de acionamento Senoidal.

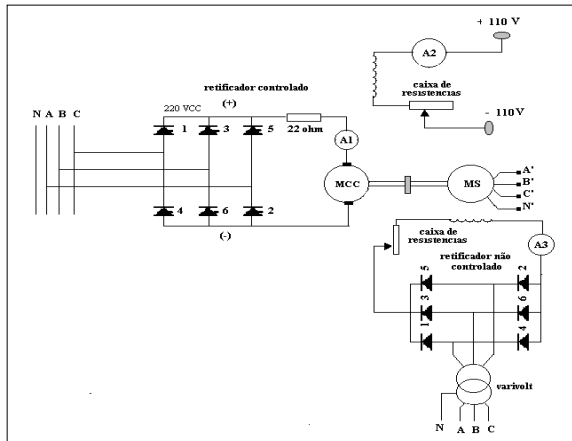


FIGURA 2: Sistema de acionamento senoidal

4.0 CONDIÇÕES OPERACIONAIS

- o arranjo para a variação da carga foi implementado com a utilização de um gerador de corrente contínua mecanicamente interligado ao MIT. A variação de carga se dava pela inserção ou retirada de resistências do circuito alimentado pelo gerador ou pela variação da corrente de excitação deste gerador;
- o mecanismo de medição de conjugado foi implementado utilizando o método do dinamômetro;
- as medidas de potências do acionamento Senoidal foram coletadas na entrada de alimentação do MIT e do acionamento PWM na entrada do inversor de freqüência;
- a freqüência nominal do conversor rotativo disponível era 50 [Hz], portanto tensões de alimentação do MIT com freqüência de 60 [Hz] foram coletadas diretamente da rede de alimentação;
- o primeiro conjunto de medições foi realizado para as condições nominais de alimentação e com o MIT operando a vazio;
- o conjugado superior limite foi determinado pelo número máximo de resistências, adicionadas em paralelo ao circuito alimentado pelo gerador de corrente contínua, que produzia a corrente nominal de placa do MIT, sendo que o ajuste fino do conjugado de carga foi conseguido através da variação da corrente de excitação do gerador de corrente contínua.

5.0 RESULTADOS OBTIDOS

5.1 – Introdução

A análise do rendimento do MIT para os sistemas de acionamento, os modos de parametrização do inversor PWM e os vários regimes de operação adotados é feita através da construção de curvas em função da variação do conjugado e freqüência. As características levantadas em função da variação do conjugado utilizam curvas de tendência, construídas a partir de funções polinomiais de terceiro grau. As características apresentadas em função da variação de freqüência utilizam funções de interpolação do MATLAB. São apresentadas as seguintes características:

- curvas em função da variação do conjugado - para as freqüências de 60, 40 e 20 [Hz];
- curvas em função da variação da freqüência - para os conjugados de 100, 60 e 20 [%].

5.2 – Curvas PWM vetorial X PWM standard

5.2.1 - Rendimento X conjugado

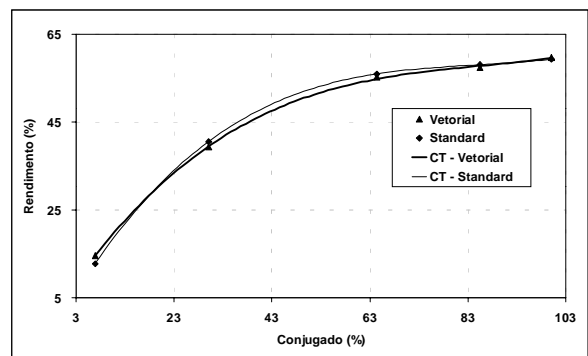


FIGURA 3: CT¹ - rendimento X conjugado (f = 60 Hz)

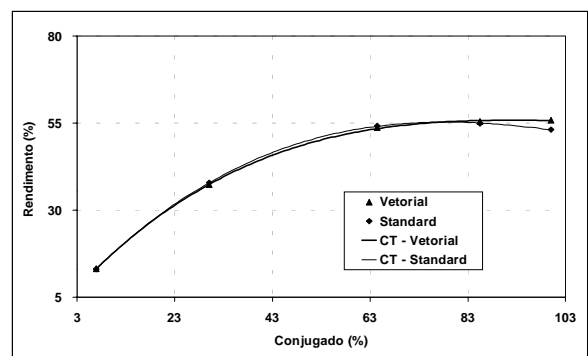


FIGURA 4: CT - rendimento X conjugado (f = 40 Hz)

¹ CT – Curvas de tendência

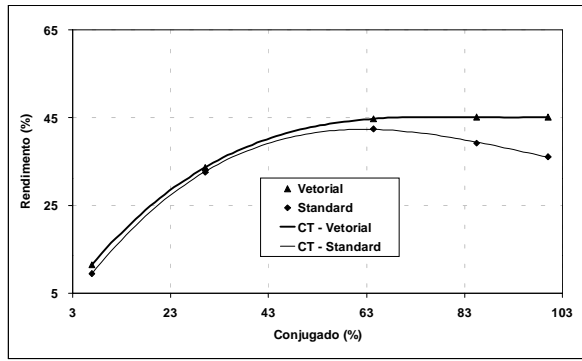


FIGURA 5: CT - rendimento X conjugado (f = 20 Hz)

5.2.2 - Rendimento X frequência

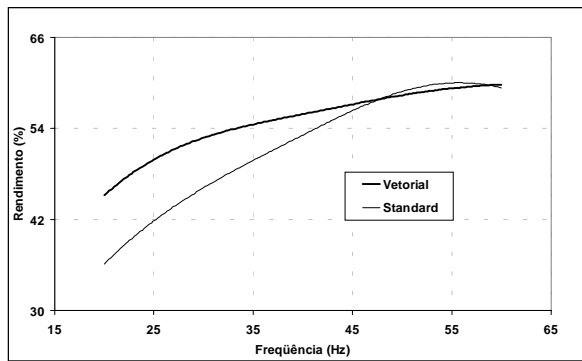


FIGURA 6: rendimento x frequência (c = 100 %)

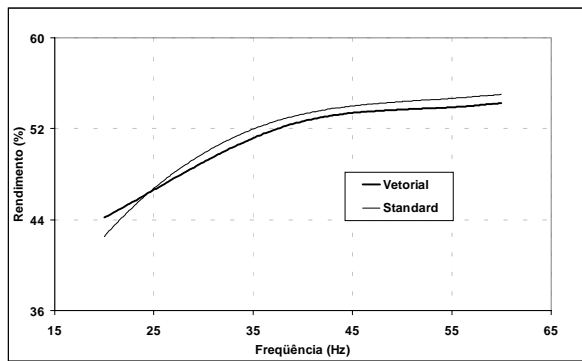


FIGURA 7: rendimento x frequência (c = 60 %)

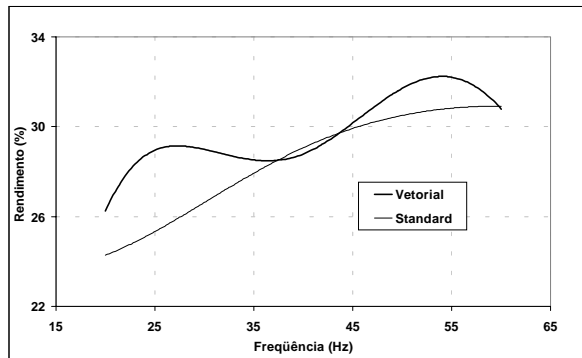


FIGURA 8: rendimento x frequência (c = 20 %)

5.3 - Curvas PWM vetorial X senoidal

5.3.1 - Rendimento X conjugado

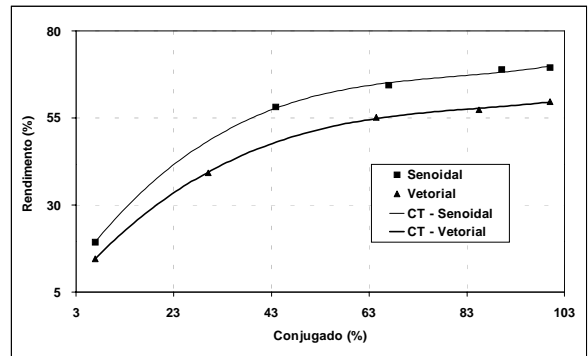


FIGURA 9: CT - rendimento x conjugado (f = 60 Hz)

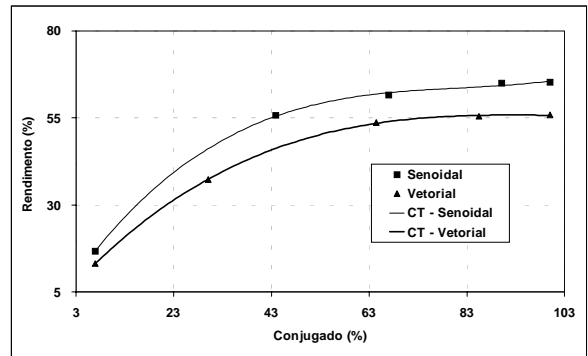


FIGURA 10: CT - rendimento x conjugado (f = 40 Hz)

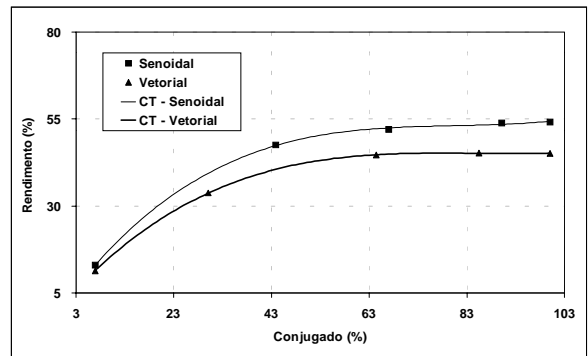


FIGURA 11: CT - rendimento x conjugado (f = 20 Hz)

5.3.2 - Rendimento X frequência

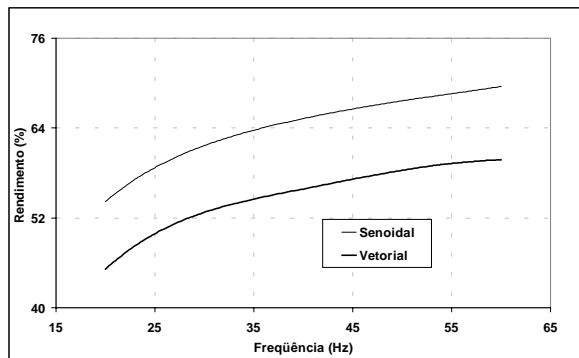


FIGURA 12: rendimento x frequência (c = 100 %)

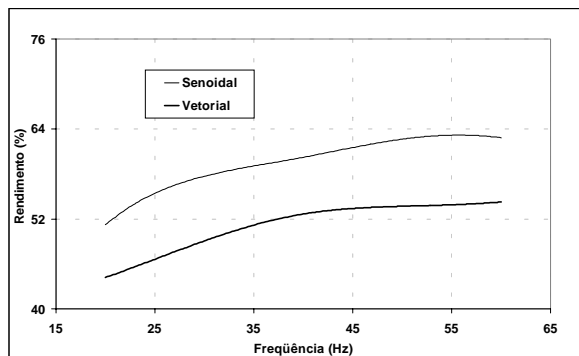


FIGURA 13: rendimento x frequência (c = 60 %)

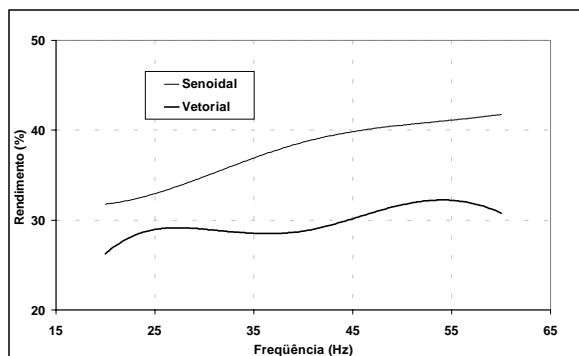


FIGURA 14: rendimento x frequência (c = 20 %)

6.0 CONCLUSÕES

Analisando os resultados obtidos para o acionamento do MIIT standard, alimentado por um sistema puramente senoidal (conversor rotativo) e também através do inversor PWM, operando nos modos escalar e vetorial, pode-se concluir:

- o acionamento senoidal possibilitou, como esperado, rendimentos sempre superiores aos verificados quando da utilização do inversor PWM. Para condições nominais de operação (tensão, corrente, frequência e conjugado nominais), o rendimento obtido com o acionamento senoidal foi da ordem de 70%, ao passo que o rendimento obtido com o

acionamento PWM, operando nos modos escalar e vetorial, foi de 60%. Verificou-se, portanto uma queda de rendimento da ordem de 10%.

- quanto aos rendimentos obtidos com os modos de parametrização do acionamento PWM (vetorial e escalar), vê-se que para valores intermediários de conjugado de carga (Figura 7 – c = 60%), o acionamento PWM com parametrização escalar possibilitou um desempenho ligeiramente melhor em frequências acima de 25 [Hz]. Abaixo de 25 [Hz], os rendimentos obtidos com a utilização da opção de parametrização vetorial foram ligeiramente superiores. Para conjugado nominal (Figura 6 – c = 100 %) o acionamento PWM com parametrização vetorial possibilitou rendimentos superiores para frequências abaixo de 45 [Hz]. Acima de 45 [Hz], pode-se afirmar que os comportamentos foram semelhantes, não ocorrendo diferenças significativas. Ainda, para conjugados reduzidos de carga (Figura 8 – c = 20 %), o acionamento PWM com parametrização vetorial possibilitou rendimentos ligeiramente superiores para baixas frequências (abaixo de 35 [Hz]) e frequências mais elevadas (acima de 45 [Hz]). Em frequências intermediárias (entre 35 e 45 [Hz]), não ocorreram diferenças significativas quanto à comparação de rendimentos. Em resumo, pode-se afirmar que para as faixas de baixos conjugados e conjugado nominal e baixas frequências (menores que 35 [Hz]), a utilização do acionamento PWM com parametrização vetorial proporciona rendimentos superiores, comparativamente aos obtidos com a opção escalar. Para as faixas intermediárias de conjugado e frequências acima de 25 [Hz], a utilização do modo de parametrização escalar permite obter rendimentos ligeiramente superiores aos da opção vetorial (da ordem de 0,6%, ou seja, praticamente o mesmo comportamento).
- Para o acionamento senoidal e conjugado nominal observou-se uma variação do rendimento da ordem de 16% entre a frequência máxima (60 [Hz]) e a mínima (20 [Hz]). Para o acionamento PWM com parametrização vetorial esta diferença foi da ordem de 9,5%.

7.0 DADOS DE PLACA DOS EQUIPAMENTOS

Motor de indução trifásico de rotor em gaiola

Potência	=	3 [CV]
Tensão	=	380 / 220 [V]
Corrente	=	5,27 / 10 [A]
Frequência	=	60 [Hz]

Motor de corrente contínua

Potência	=	35 [HP]
Rotação	=	1500 [RPM]
Tensão	=	220 [V]
Excitação	=	3,05 [A]

Gerador síncrono

Potência	=	35 [KVA]
Rotação	=	1500 [RPM]
Excitação	=	6,7 [A]
Corrente	=	91,8 [A]

8.0 AGRADECIMENTO

Os autores deste trabalho agradecem ao professor Valberto Ferreira da Silva da EFEI, pela cessão do inversor PWM - Siemens, o qual foi utilizado para se implementar o acionamento do MIT de 3 [CV], Búfalo, utilizado neste trabalho.

9.0 BIBLIOGRAFIA

- (1) Simovert Master Drives - Operating Instructions – SIEMENS.
- (2) David D. Shipp and William S. Vilcheck - Power Quality and Line Considerations for Variable Speed AC Drives - IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 32, No 2, March/April 1996.
- (3) Austin H. Bonnett - Analysis of the Impact of Pulse-Width Modulated Inverter Voltage Waveforms on AC Induction Motors - IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 32, No 2, March/April 1996.
- (4) Jocélio Souza de Sá – Acionamentos Elétricos/1 Parte - EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá.
- (5) Hugo Luiz Sepúlveda - Máquinas Elétricas – Máquinas Síncronas - Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal de Minas Gerais.
- (6) Alexandre Rasi Aoki – Introdução ao MATLAB – EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá.
- (7) The Math Works Inc. – MATLAB – Guia do Usuário – Makron Books.