

**ESTUDO DE CASO DE SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS EM
SISTEMA DE ACIONAMENTO DE MOTOR DE INDUÇÃO POR
MODULAÇÃO PWM EM EQUIPAMENTO MÉDICO-HOSPITALAR
DE RAIOS-X**

JACQUES WAGNER RODRIGUES DE ALMEIDA

Monografia submetida à Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Engenharia de Sistemas Elétricos de Potência – CESEP, Ênfase: Proteção Elétrica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do certificado da Especialização.

Aprovada em ____ de _____ de 2012

Alberto Resende De Conti - Dr.

Supervisor

Silvério Visacro Filho - Dr.

Coordenador do CESEP

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 RELEVÂNCIA E CONTEXTO DA INVESTIGAÇÃO	1
1.2 OBJETIVO E METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO	4
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	4
2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA E MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS	5
2.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	5
2.2 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA	7
2.3 MEDIÇÕES EM LABORATÓRIO	14
2.3.1 Considerações Sobre os Instrumentos de Medição.....	14
2.3.2 Resultados Experimentais.....	16
3. SOBRETENSÕES NOS TERMINAIS DE MOTORES DE INDUÇÃO CAUSADAS POR PULSOS PWM	19
3.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA MODULAÇÃO PWM.....	19
3.2 INFLUÊNCIA DO TEMPO DE SUBIDA DO PULSO PWM	20
3.3 RELAÇÃO ENTRE A AMPLITUDE E A FREQUÊNCIA DAS SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS E O COMPRIMENTO CRÍTICO DO CABO	22
3.4 EFEITOS DA CORRENTE DE MODO COMUM	26
4. DESENVOLVIMENTOS	28
4.1 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DO SISTEMA ESTUDADO NO ATP	28
4.1.1 Representação Computacional da Forma de Onda PWM.....	28
4.1.2 Representação Computacional do Cabo	28
4.1.3 Representação Computacional do Motor.....	29
4.2 SIMULAÇÃO E COMPARAÇÕES COM OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	31
4.3 DISCUSSÃO.....	34
4.4 AÇÕES PROPOSTAS	35

5. CONCLUSÕES	38
5.1 CONCLUSÕES	38
5.2 PROPOSTA DE CONTINUIDADE	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

RESUMO

Uma exigência permanente em equipamentos eletro-eletrônicos é a necessidade de confiabilidade e estabilidade máximas. O estudo aqui apresentado é motivado pela ocorrência de falhas operacionais e defeitos no motor de indução utilizado no sistema de raios-X de um equipamento de diagnóstico médico. Esse motor, denominado anodo giratório, é controlado por um inversor de frequências que gera pulsos PWM. Tendo como base medições realizadas em laboratório, que indicaram a ocorrência de sobretensões elevadas nos terminais do motor em determinadas condições de operação, decidiu-se investigar o fenômeno de propagação dos pulsos PWM gerados pelo inversor ao longo dos cabos de conexão e a reflexão desses pulsos na junção cabo/motor. Para isso, foram realizadas análises teóricas com o auxílio da plataforma computacional ATP (*Alternative Transients Program*). Nessas análises, buscou-se identificar a influência do tempo de subida dos pulsos PWM e do comprimento dos cabos nas sobretensões geradas nos terminais do motor. Em seguida, foi implementado na plataforma ATP um modelo simplificado de um sistema real envolvendo inversor, cabo e motor, que foi validado por meio de comparações com dados experimentais. Tal modelo foi utilizado na investigação de medidas que pudessem minimizar as sobretensões verificadas nos terminais do motor. Os resultados obtidos indicam que a utilização de um filtro RC na junção cabo/motor é capaz de mitigar satisfatoriamente tais sobretensões. Espera-se que a instalação desse filtro no equipamento de diagnóstico médico investigado neste trabalho possa contribuir para um aumento da vida útil do motor de indução ali presente e, eventualmente, para uma redução nas falhas operacionais verificadas neste equipamento.

ABSTRACT

A permanent requirement of electrical and electronic equipment is the need for maximum reliability and stability. The study presented here is motivated by the occurrence of operational failures and damages to an induction motor used in X-ray medical diagnostic equipment. This induction motor, which is identified as spinning anode, is controlled by a driver system that uses PWM pulses. Based on measurements performed in laboratory, which indicated the occurrence of high overvoltages at the motor terminals under certain operating conditions, it was decided to investigate the propagation of the pulses generated by the PWM driver over the connecting cable and the reflection of these pulses at the cable/motor junction. For this, theoretical analyses were performed with the aid of the Alternative Transients Program (ATP). Such analyses intended to identify the influence of the rise time of the PWM pulses and the length of the cables in the overvoltages generated at the motor terminals. Then, a simplified model was implemented in ATP to represent a system composed of driver, cables and motor. This model, which was validated through comparisons with experimental data, was used to investigate actions that could minimize overvoltages at the motor terminals. The obtained results indicate that an RC filter installed at the cable/motor junction is able to satisfactorily reduce such overvoltages. It is expected that the setup of this filter in the medical diagnostic equipment investigated in this study may help to increase the lifetime of the induction motor present there and possibly to reduce operational failures observed in this equipment.

1 Introdução

1.1 *Relevância e Contexto da Investigação*

A utilização de equipamentos médico-hospitalares de diagnóstico por imagens tem sido cada vez mais freqüente na identificação e no tratamento de doenças. A aplicação dessa tecnologia permite a realização de procedimentos menos traumáticos para os pacientes, evitando em diversas situações a necessidade de intervenções cirúrgicas complexas. Esse é o caso, por exemplo, de cirurgias do coração, onde a caixa torácica do paciente é aberta e uma secção de um vaso sanguíneo é enxertada da aorta para a artéria coronária (vaso sanguíneo do coração). Esse procedimento é realizado para que seja contornado, através de uma ponte, o seguimento bloqueado por depósito de placas de gordura na parede dessa mesma artéria coronariana.

O surgimento dos aparelhos de raios-X, especificamente o aparelho de hemodinâmica, trouxe para os cardiologistas, neurocirurgiões e cirurgiões vasculares uma facilidade de diagnóstico de doenças cardiovasculares (cateterismo) e do tratamento dessas doenças através da angioplastia, sem a necessidade da abertura da caixa torácica do paciente. Com a utilização desse aparelho, através de uma pequena dissecção (incisão cirúrgica pouco traumática) ou de uma punção (similar ao exame de sangue), ambas com anestesia local, pode-se introduzir no paciente um cateter (sonda) que permite a injeção do contraste (líquido opaco aos raios-X) necessário para a visualização das artérias. A dissecção ou punção pode ser realizada através da artéria radial (local onde se mede a pulsação no punho), da artéria braquial (oposta ao cotovelo) ou da artéria femoral (virilha). Dessa forma, pode-se fazer o estudo das artérias do sistema cardiovascular e se necessário, desobstruí-las através de um procedimento onde se infla um balão cilíndrico para que haja a compressão das placas de gordura contra as paredes da artéria. Esse procedimento, que facilita a passagem do sangue pela artéria, é posteriormente revertido. Para isso, o balão é desinflado e retirado através do cateter.

Em casos mais críticos, a desobstrução da artéria é realizada com a implantação de um “*stent*” no local lesionado. Este é montado sobre um balão cilíndrico que é inflado no ponto a ser desobstruído. A abertura do “*stent*” comprime as placas de gordura contra as paredes internas da artéria lesionada. O balão é posteriormente desinflado e o “*stent*” fica

permanentemente instalado na artéria. As Figuras 1.1 e 1.2 mostram, respectivamente, um estudo coronariano em um aparelho de hemodinâmica e uma representação de utilização de um “*stent*” no tratamento da lesão (angioplastia). O bloqueio de uma ou mais artérias coronarianas impede o fluxo de sangue para os músculos do coração, podendo causar a falência cardíaca.



Figura 1.1- Imagem de um procedimento de cateterismo coronariano realizado em equipamento de raios-X [1].

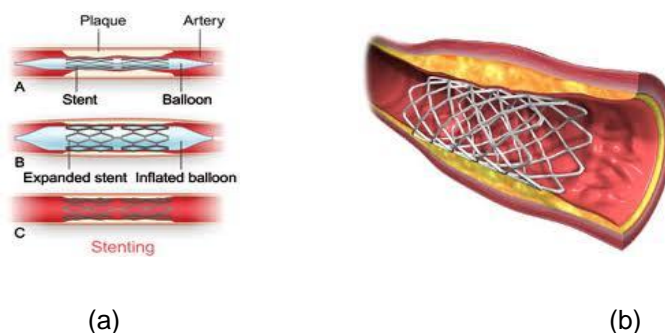


Figura 1.2- (a) A – Introdução de um “*stent*” através de um cateter balão no ponto da artéria onde há placas de gordura; B – Colocação do “*stent*” através do balão inflado; C – “*stent*” implementado na artéria com a compressão das placas de gordura. Balão já desinflado e removido através do cateter. (b) visualização detalhada do “*stent*” [2].

Segundo a literatura médica, as doenças cardiovasculares são a principal causa de óbito no mundo. O grupo de risco das doenças cardiovasculares compreende os diabéticos, os hipertensos, os fumantes, as mulheres que ingerem anticoncepcional, os obesos e os que possuem histórico familiar com casos de doenças cardiovasculares. Pressão alta, artérias e vasos obstruídos e insuficiência cardíaca, se não tratados, culminam em infarto (obstrução aguda de uma artéria coronária resultando em necrose do músculo cardíaco) e/ou AVC (acidente vascular cerebral) [1, 2 ,3].

Com a disseminação dos benefícios e os ótimos resultados dos procedimentos realizados em equipamentos de diagnóstico por imagens, os fabricantes de equipamentos de raios-X aumentaram a demanda e a busca de novas tecnologias aplicáveis para esse tipo de geração de imagem. Com a necessidade de novos modelos de equipamentos, tomando como base as limitações dos aparelhos mais antigos, gerou-se uma corrida entre os fabricantes de equipamentos de raios-X no desenvolvimento de aparelhos mais modernos. No entanto, com os novos projetos surgiram novos problemas e, conseqüentemente, novos desafios para a interpretação e busca de mitigação desses problemas.

Neste contexto, tem sido identificado um problema operacional em um determinado modelo de aparelho médico-hospitalar de hemodinâmica. Esse problema se refere às quebras prematuras de motores de indução presentes dentro dos tubos de raios-X e também ao travamento do circuito com inversores PWM responsável pelo acionamento desse motor de indução. O tubo de raios-X é a parte do aparelho responsável pela emissão das ondas de mesmo nome, que permitem a obtenção das imagens com a utilização de um receptor que converte os raios-X incidentes em luz visível. O motor de indução presente no tubo de raios-X encontra-se no lado denominado anodo e é usualmente chamado de anodo giratório. A necessidade de emprego do motor de indução se dá devido à alta diferença de potencial entre o catodo e o anodo, que faz com que elétrons presentes no catodo sejam acelerados até se chocarem com o anodo. Se a área de colisão presente no anodo fosse estática, a constante colisão dos elétrons em um mesmo ponto fundiria o material utilizado no anodo. Desta forma, há a necessidade do giro constante do disco do anodo, o que é feito através do motor de indução.

Os problemas verificados na operação do anodo giratório ocorrem quando há o chaveamento do inversor presente no módulo denominado arranque do anodo, para a condição de frenagem do motor de indução. Tais problemas foram evidenciados durante a fase de comercialização do aparelho, dificultando as ações para busca de medidas para a solução.

A importância dos problemas relacionados à degradação prematura de motores alimentados por modulação PWM e falhas decorrentes devido ao emprego desta técnica têm sido foco de estudos na literatura específica ao assunto. No entanto, não é de conhecimento deste autor a existência de um estudo sobre diagnósticos de problemas relacionados aos motores de indução de tubos de raios-X alimentados por modulação PWM. Neste cenário, situa-se o desenvolvimento desta monografia.

1.2 Objetivo e Metodologia de Desenvolvimento

O objetivo do presente trabalho consiste na apresentação e investigação do comportamento de um motor de indução utilizado em um equipamento de raios-X e dos efeitos associados aos pulsos gerados por um inversor PWM utilizado na alimentação deste motor. A metodologia proposta consiste na montagem em bancada do circuito avaliado e na elaboração de uma simulação computacional a fim de se estudar a resposta deste circuito frente às solicitações causadas pelos pulsos PWM. Com base nas análises realizadas, são discutidas possíveis causas de falhas e avaliadas ações de proteção pertinentes. Para as avaliações dos casos de interesse foram utilizados modelos disponíveis na plataforma computacional ATP (*Alternative Transients Program*).

1.3 Organização do texto

O texto desta monografia foi distribuído em 6 capítulos, incluindo a presente **Introdução**.

O **Capítulo 2** apresenta o circuito eletrônico foco do estudo e também amostras de formas de onda de tensão obtidas em laboratório que permitem a identificação do funcionamento desse circuito em diferentes condições de operação.

No **Capítulo 3** apresenta-se uma discussão teórica referente às sobretensões que aparecem nos terminais de motores de indução alimentados por inversores utilizando modulação PWM. Para isso, conta-se com o emprego da plataforma computacional ATP.

No **Capítulo 4**, através de simulações computacionais, são propostas ações para a redução das sobretensões verificadas nos terminais do motor de indução foco deste trabalho.

No **Capítulo 5** são apresentadas as conclusões deste trabalho e uma possível proposta de continuidade.

Ao final do texto são apresentadas as **Referências Bibliográficas** utilizadas.

2

Descrição do Sistema e Medições Experimentais

2.1 Considerações Preliminares

A motivação para esta monografia surgiu de relatos de falhas em sistemas reais de acionamento de motores com inversores PWM. Como se sabe, a forma de onda de tensão de saída de um inversor PWM senoidal é na verdade um trem de pulsos de largura variável, os quais apresentam amplitudes iguais ao valor da tensão no barramento CC e são transmitidos ao motor através do cabo alimentador [4]. Ao incidirem nos terminais do motor, esses pulsos podem gerar sobretensões que, a longo prazo, podem comprometer o isolamento do motor e gerar fadiga prematura ou falhas.

Na presente monografia, tem-se como objeto de estudo um gerador de alta frequência responsável pela emissão de raios-X destinados à realização de diagnósticos e/ou intervenções cirúrgicas através de imagens em tempo real (sistemas médicos de diagnósticos por imagens). Nesse gerador, são utilizados dois circuitos independentes que exercem funções distintas na geração dos raios-X. Um desses circuitos tem apresentado problemas com certa frequência, o que tem causado transtornos na operação do equipamento de raios-X. A geração de raios-X, conforme citado no capítulo 1, é conseguida através de um tubo de mesmo nome composto por um catodo e um anodo. No lado do catodo existem dois filamentos descritos como foco fino e foco grosso. Estes trabalham alternadamente, dependendo da necessidade de resolução da imagem resultante através de um receptor. Através de uma alta tensão aplicada no catodo, o filamento, selecionado via painel de operação (foco fino ou foco grosso), torna-se incandescente fazendo com que elétrons em alta velocidade se choquem com o anodo giratório, emitindo assim as ondas de raios-X. Quanto mais aquecido for o filamento, mais elétrons serão emitidos e maior será a corrente que fluirá entre anodo e catodo. O anodo, caracterizado como o pólo

positivo do tubo, serve de suporte para o alvo e atua como elemento condutor de calor. O anodo deve ser feito de um material de boa condutividade térmica, elevado ponto de fusão e elevado número atômico. Em geral, utiliza-se para isso o tungstênio. Os tubos de anodo giratório são usados em máquinas de alta corrente devido ao aumento da área de impacto dos elétrons em comparação com a utilização de um anodo fixo com alvo estático. Se o disco do anodo fosse estático, para o equipamento em questão, a colisão dos elétrons sempre no mesmo ponto fundiria esse anodo devido à alta temperatura dissipada, danificando tal peça. Com a necessidade do giro do disco anódico, este, que possui forma de prato, é acoplado a um motor de indução acionado por inversores PWM. O problema em questão se refere ao mal funcionamento do gerador quando o circuito responsável pelo controle do anodo giratório do tubo de raios-X entra em operação para interromper a rotação do motor de indução do anodo, passado o tempo configurado para tal tarefa. Além da geração de erro que impossibilite uma nova emissão de raios-X na operação em curso, a ocorrência sucessiva desse tipo de falha pode levar à quebra prematura do motor de indução presente no encapsulamento do tubo de raios-X. Na seção a seguir, descreve-se o funcionamento do circuito responsável pelo acionamento do anodo giratório. O tubo de raios-X encontra-se ilustrado na Figura 2.1.

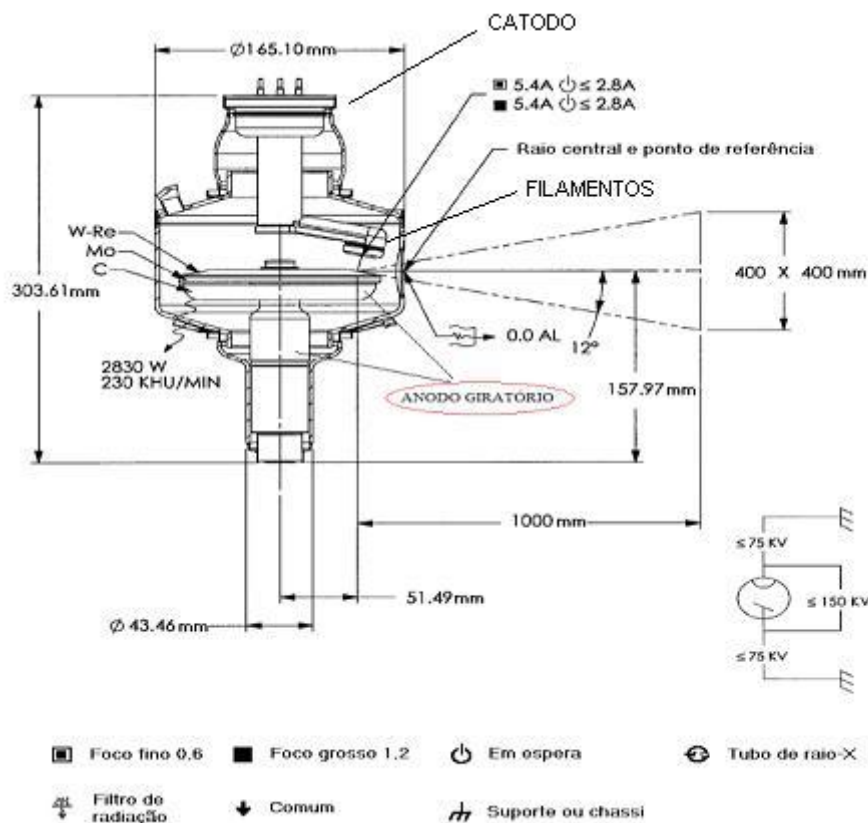


Figura 2.1 - Ampola de geração de raios-X com destaque para o anodo giratório (parte inferior do encapsulamento ilustrado na figura) [5].

2.2 Configuração do Sistema

O gerador de raios-X utilizado nos ensaios consiste em um módulo trifásico com tensão de linha de 480 V. Após ser retificada, a tensão de entrada é aplicada em um banco capacitivo que alimenta o inversor responsável pela geração dos raios-X através de um transformador de alta tensão. Simultaneamente, esse mesmo banco capacitivo alimenta um segundo circuito inversor responsável pelo controle do motor de indução do anodo do tubo de raios-X. O diagrama em blocos do circuito de acionamento e controle do motor de indução do tubo de raios-X está ilustrado na Figura 2.2.

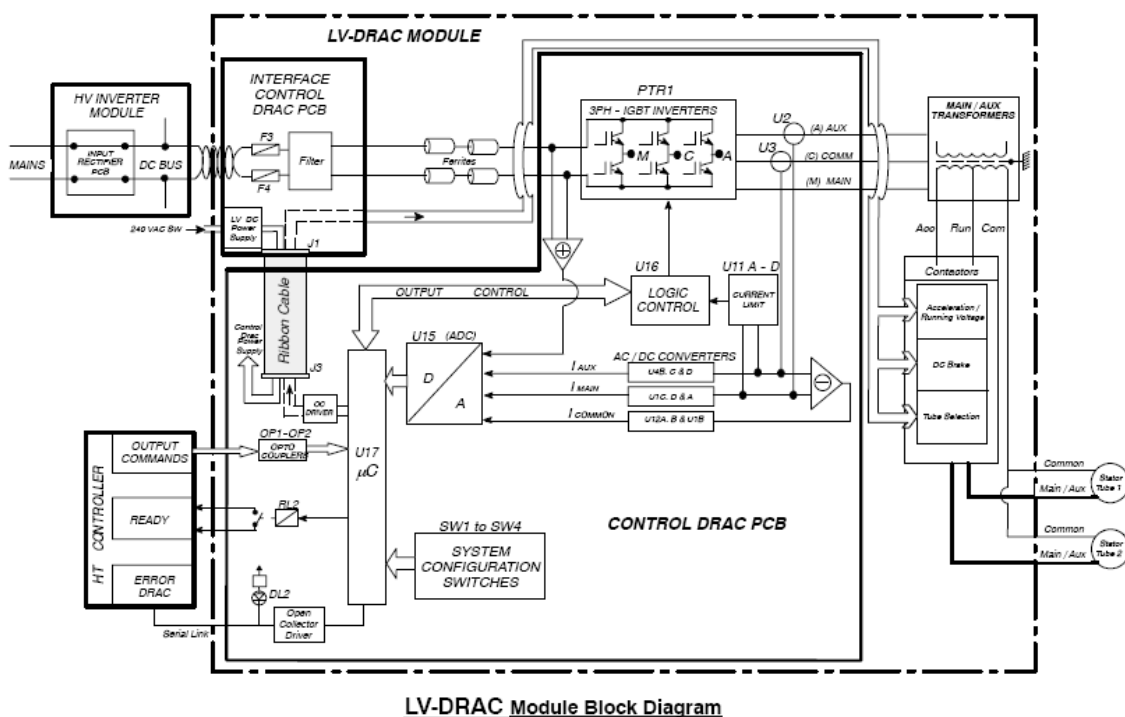


Figura 2.2 - Diagrama em blocos do circuito de acionamento e controle do motor do anodo do tubo de raios-X [6].

O circuito responsável pelo acionamento do anodo giratório é composto basicamente pelo circuito de controle dos inversores (CONTROL DRAC PCB), por inversores (SEMIKRON IGBT MODULES SKM 75 GD 123 D) e por transformadores de corrente destinados a amostrar as correntes no enrolamento principal e no enrolamento auxiliar, a fim de identificar sobrecorrentes ou subcorrentes. Desses transformadores partem cabos blindados $3 \times 1,5 \text{ mm}^2 + 1 \times 2,5 \text{ mm}^2$ V/A (aterrado dos dois lados) com comprimento de 20 m. Esse módulo alimenta e controla o motor de indução no qual cinco períodos de operação devem ser considerados:

- Aceleração para 3.300 RPM e frenagem para a condição de repouso;
- Manutenção da velocidade nominal em 3.300 RPM;
- Aceleração para 10.000 RPM e frenagem para a condição de repouso;
- Manutenção da velocidade nominal em 10.000 RPM;
- Frenagem de 10.000 RPM simultaneamente à aceleração para 3.300 RPM.

O fluxograma com as seqüências possíveis de operação do anodo giratório (motor de indução) encontra-se ilustrado na Figura 2.3.

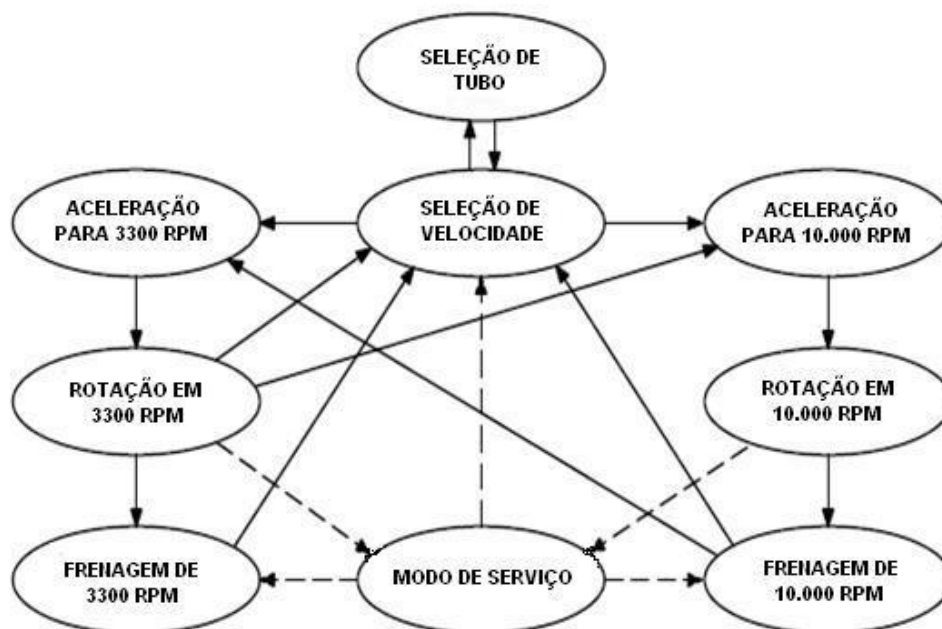


Figura 2.3 - Fluxograma de operação do anodo giratório [6].

As duas velocidades descritas são necessárias porque o tubo de raios-X pode trabalhar, conforme já relatado, com dois filamentos no catodo (foco fino e foco grosso) sendo que para este último são obtidos os maiores valores de corrente de filamento e conseqüentemente maior nível de radiação. Tal afirmativa justifica a necessidade de uma velocidade nominal maior do anodo quando há a utilização do foco grosso (10.000 RPM). Quando o aparelho é utilizado apenas para o posicionamento do cateter (material utilizado pelo médico para injetar contraste nas artérias do paciente), não é exigida uma grande quantidade de radiação (menor quantidade de elétrons em choque com o anodo) e, conseqüentemente, a velocidade do anodo pode ser

menor (3.300 RPM). As frenagens do motor são realizadas quando o aparelho, após um tempo pré-estabelecido, deixa de emitir raios-X.

As velocidades de operação do motor são controladas pela variação da frequência e da largura de pulso do sistema de modulação PWM, que define a tensão média aplicada no estator. A relação entre a velocidade síncrona e a frequência é dada por:

$$n_s = 120.f/p \quad (1)$$

Onde p corresponde ao número de pólos e f é a frequência.

Para a velocidade nominal de 3.300 RPM os inversores, que aplicam no motor uma rajada de pulsos em uma frequência de chaveamento da ordem de kHz, compõem uma forma de onda de tensão não senoidal com frequência aproximada de 60 Hz. Para a velocidade de rotação de 10.000 RPM, gera-se uma frequência aproximada de 180 Hz. As formas de onda de tensão correspondentes às duas velocidades estão ilustradas nas Figuras 2.4 e 2.5, respectivamente, e foram adquiridas através de medições na saída do inversor, utilizando um osciloscópio TEKTRONIX TDS 1002B e pontas de prova Tektronix P220. Essas formas de onda correspondem à operação do motor em regime permanente.

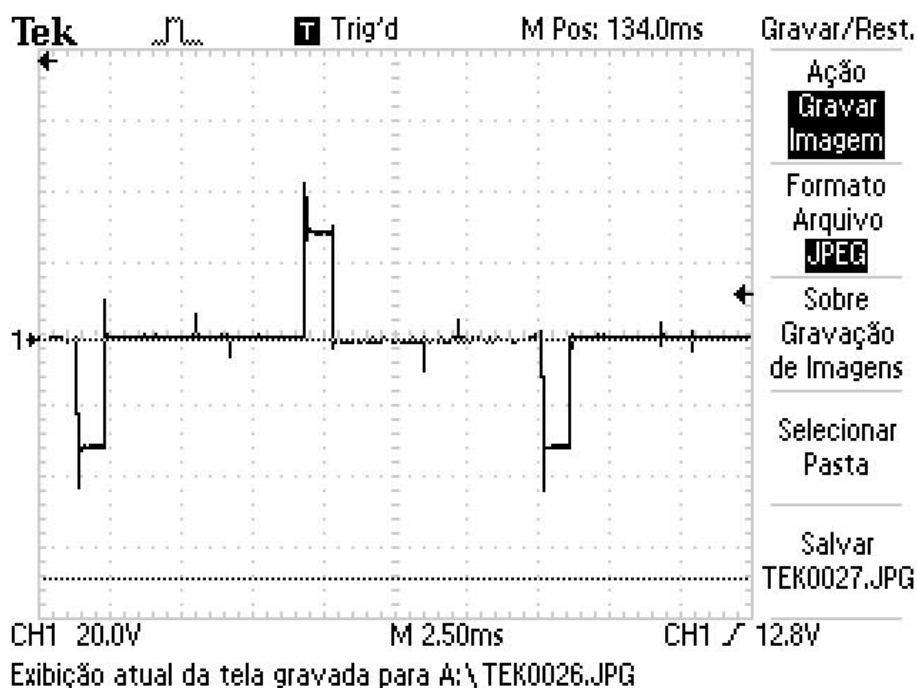


Figura 2.4 – Forma de onda de tensão referente ao chaveamento dos IGBT's quando o motor opera em 3.300 RPM (60 Hz).

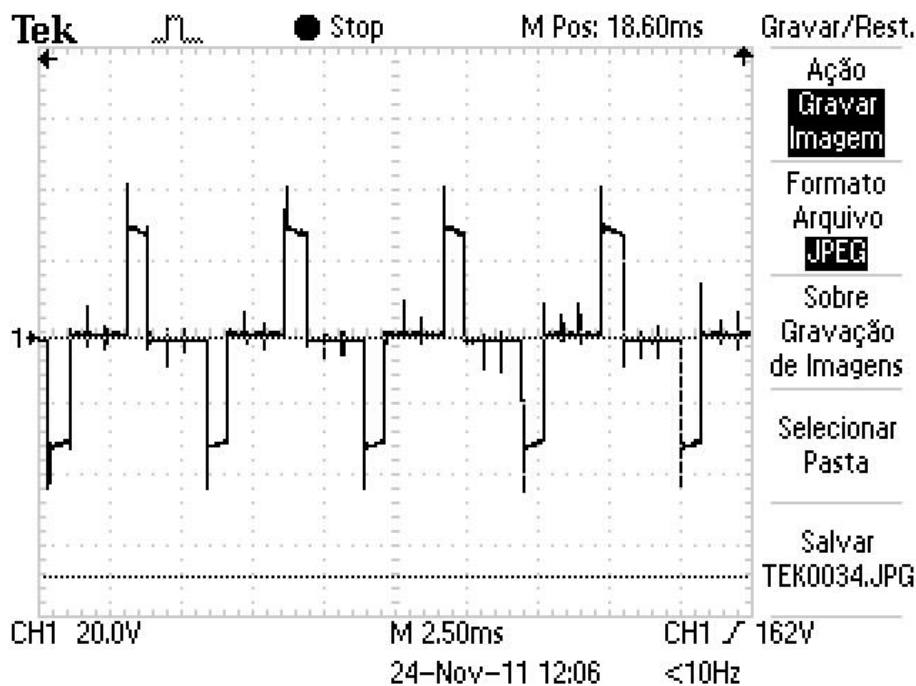


Figura 2.5 – Forma de onda de tensão referente ao chaveamento dos IGBT's quando o motor opera em 10.000 RPM (180 Hz).

As duas formas de onda de tensão ilustradas nas Figuras 2.4 e 2.5 foram obtidas na saída do inversor por meio de um dos transformadores de corrente presentes no circuito. Essas formas de onda de tensão de saída são proporcionais aos pulsos de corrente enviados pelo inversor ao estator do motor. Nas situações ilustradas, os chaveamentos responsáveis pelas velocidades nominais não levam a qualquer tipo de problemas no gerador de raios-X porque a amplitude da tensão dos pulsos, os quais estão apresentados em uma relação de 10 para 1 devido à utilização de um transformador abaixador na proporção da escala informada, é pequena se comparada às condições de aceleração e de desaceleração.

Nas figuras a seguir, nas quais as amplitudes também estão representadas em escala 10:1, são mostradas as formas de onda de tensão nas condições de aceleração e desaceleração do motor. Estas são divididas nas seguintes situações:

- Aceleração para o vencimento da inércia inicial, ou seja, alcance da velocidade de 3.300 RPM ou primeiro estágio para o alcance de 10.000 RPM dependendo da aplicação utilizada (Figura 2.6);
- Frenagem automática do anodo de 3.300 RPM para a condição de repouso ou velocidade nula (Figura 2.7);

- Aceleração para o alcance da velocidade de 10.000 RPM estando o anodo girando a 3.300 RPM (Figura 2.8);
- Frenagem automática do anodo de 10.000 RPM para a condição de repouso ou velocidade nula (Figura 2.9);
- Frenagem automática do anodo de 10.000 RPM simultaneamente à solicitação de aceleração para 3.300 RPM (Figura 2.10).

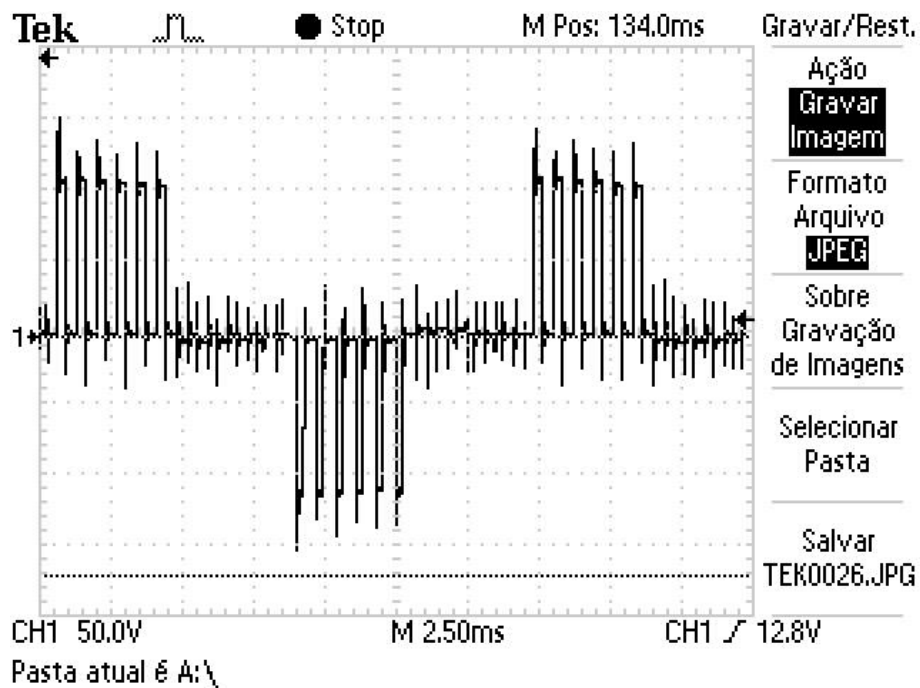


Figura 2.6 – Forma de onda tensão referente ao chaveamento dos IGBT's para o vencimento da inércia inicial, ou seja, alcance da velocidade de 3.300 RPM ou primeiro estágio para o alcance de 10.000 RPM (60 Hz).

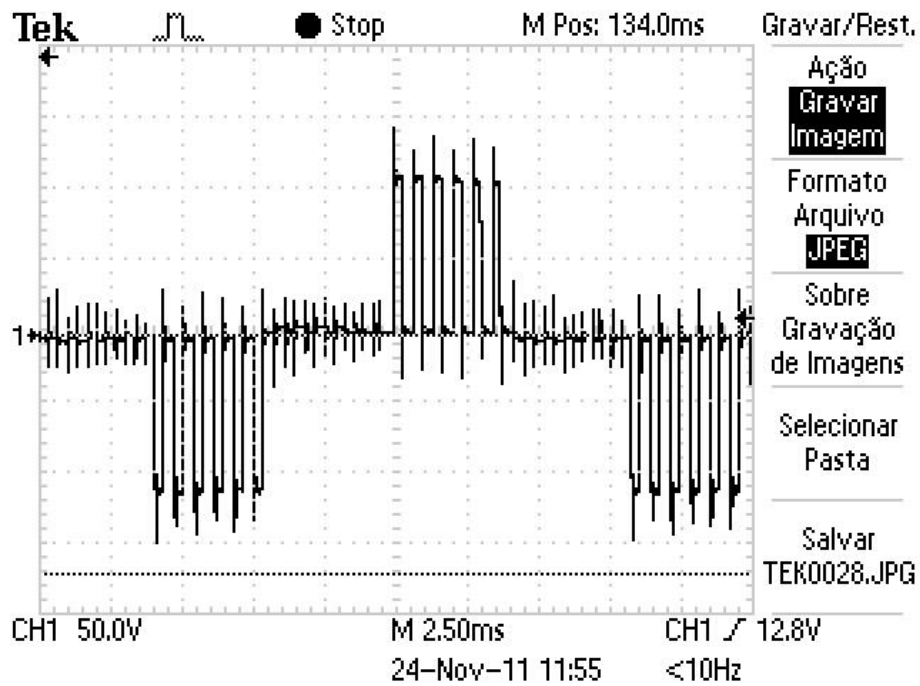


Figura 2.7 – Forma de onda de tensão referente ao chaveamento dos IGBT's para a desaceleração de 3.300 RPM para a condição de repouso (60 Hz).

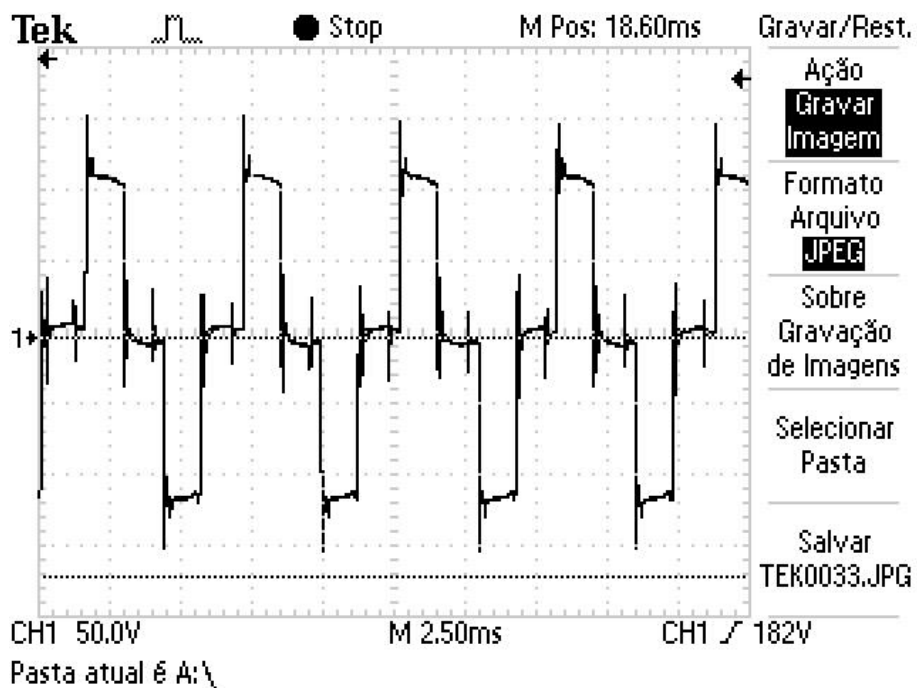


Figura 2.8 – Forma de onda de tensão referente ao chaveamento dos IGBT's para a aceleração para o alcance da velocidade de 10.000 RPM estando o anodo girando a 3.300 RPM (180 Hz).

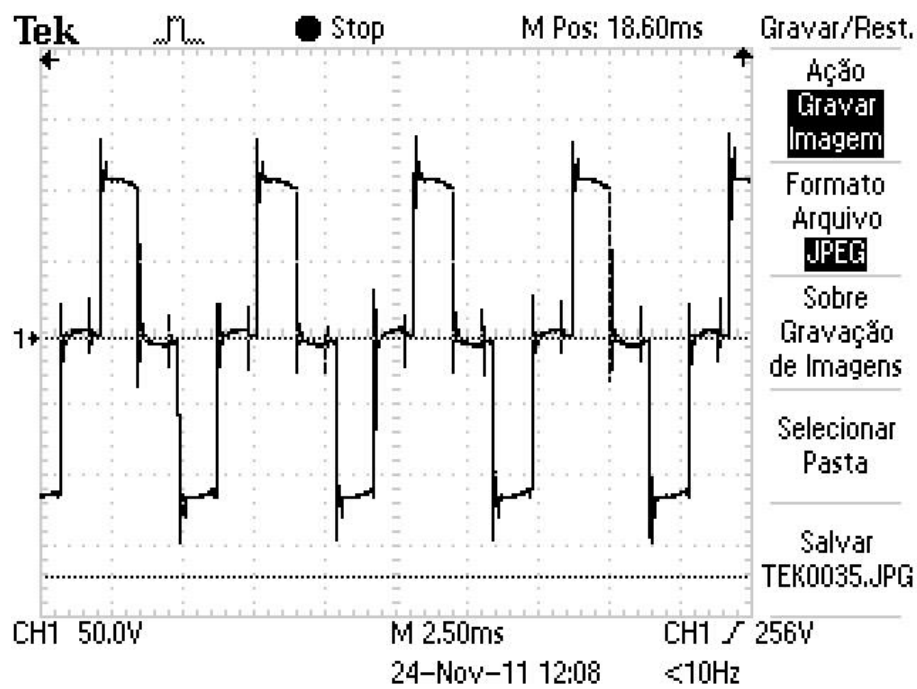


Figura 2.9 – Forma de onda de tensão referente ao chaveamento dos IGBT's para a frenagem automática do anodo de 10.000 RPM para a condição de repouso ou velocidade nula (180 Hz).

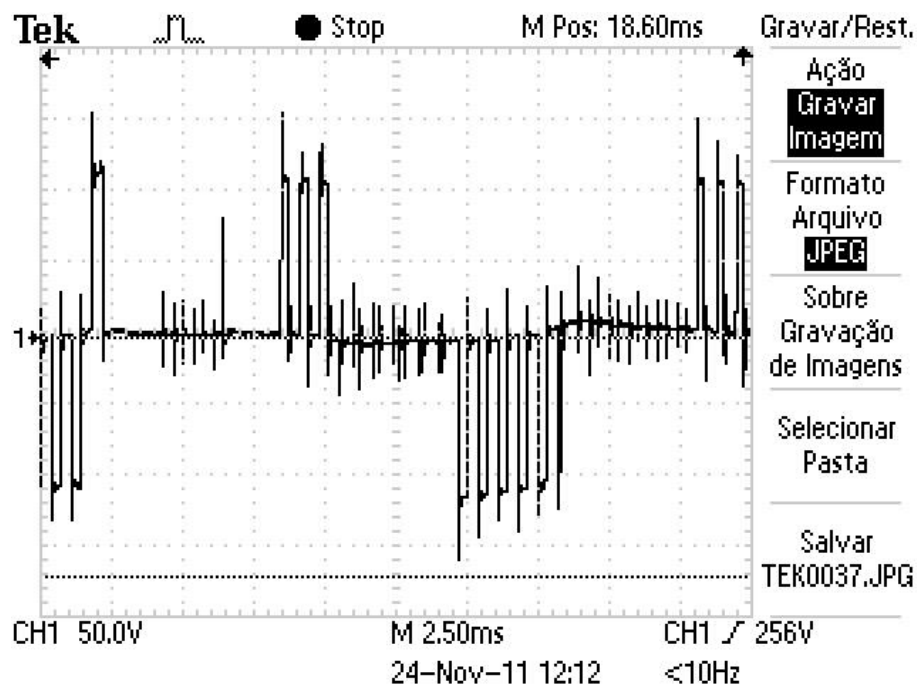


Figura 2.10 – Forma de onda de tensão referente ao chaveamento dos IGBT's para a frenagem automática do anodo de 10.000 RPM no mesmo instante em que é solicitada a técnica referente à aceleração para 3.300 RPM (60 Hz).

Na situação apresentada na Figura 2.10, quando ao final da frenagem automática do motor o gerador é novamente acionado para uma nova exposição de raios-X, o equipamento tem apresentado uma falha intermitente referente à sobrecarga do circuito. Essa sobrecarga é detectada pela placa de controle, que, através de um sinal analógico convertido para digital, interrompe o funcionamento do circuito.

É importante salientar que as formas de onda mostradas nesta seção não foram adquiridas para analisar o tempo de subida, reflexões e correntes de modo comum associadas à operação do inversor. As figuras apresentadas têm tão somente a função de demonstrar de forma clara o funcionamento do circuito e em que condição o mesmo se apresenta instável.

2.3 Medições em Laboratório

Após a análise do funcionamento do circuito em situações variadas e a detecção, conforme explanado na seção anterior, da condição de operação onde este se apresenta instável e/ou sob condição de falha, foram realizadas, em bancada de laboratório, medições específicas na condição citada, obtendo-se amostras de formas de ondas de tensão para a caracterização do problema e o confronto dos dados obtidos com simulações computacionais.

Para tais medições foram utilizados um gerador de raios-X, conforme funcionamento apresentado na seção anterior, e cabos de interligação entre o conversor CC/CA e o motor que integra o tubo de raios-X. Os instrumentos utilizados nas medições são os seguintes: osciloscópio TEKTRONIX TDS 1002B, pontas de prova Tektronix P220 e um transformador abaixador 10:1 para proteção do osciloscópio.

2.3.1 Considerações Sobre os Instrumentos de Medição

Para as medições em bancada, conforme mencionado, foi utilizado um osciloscópio TEKTRONIX TDS 1002B – 60 MHz – 1 GS/s. A ponta de prova consiste em um cabo de 1 metro com um resistor de precisão R e um capacitor variável C em paralelo com R. Ajustando o valor de C é possível reduzir eventuais distorções nas formas de onda medidas. O osciloscópio utilizado possui um gerador interno que gera um sinal de tensão de 1 kHz de alta precisão. Para o ajuste, liga-se a ponta de prova na saída do sinal de calibração “*Probe Check*”. Considera-se a ponta de prova ajustada desta forma “compensada”.

A operação descrita acima se faz necessária devido à capacitância interna do instrumento, a qual faz com que a tensão medida dependa da frequência [7]. A “ponta compensada” permite que as medições não apresentem formas de onda deformadas.

Outro fator é a indutância do cabo utilizado pela ponta de prova. Porém, segundo [7], a indutância do cabo da ponta de prova não afeta medições com frequências de até 10 MHz. Por exemplo, o cabo RG-58U, utilizado em pontas de provas, possui uma indutância de cerca de 250 nH/m, a qual não representa uma alteração considerável nas medidas práticas.

O sinal na entrada do osciloscópio é idêntico ao sinal visto pela ponta de prova compensada e atenuado por um fator $1 + R / R_{int}$ que não depende da frequência, onde:

- R = Resistor de precisão da ponta de prova;
- R_{int} = Resistência interna do osciloscópio;

Porém, isto não significa que o sinal visto pela ponta de prova seja igual ao sinal real no circuito. Para isto é necessário que o módulo da impedância do instrumento, incluindo a ponta de prova, seja muito maior que a impedância do circuito ($Z_{int} = R // C + R_{int} // (C_c + C_{int})$).

Onde:

- Z_{int} = Impedância do instrumento (osciloscópio + cabo);
- C = Capacitor variável da ponta de prova;
- C_c = Capacitância do cabo ou ponta de prova;
- C_{int} = Capacitância interna do osciloscópio.

Com relação ao transformador abaixador isolador 10:1, este foi desenvolvido exclusivamente para medições de circuitos de potência para permitir a proteção de instrumentos de medição. O transformador possui um grau de laminação M6 e pode suportar tensões acima de 600 V. Esse transformador é envernizado e totalmente encapsulado com a utilização de resina em um invólucro cúbico de duas polegadas. Isto fornece proteção contra vibrações, choques e umidade. O transformador possui um conector BNC macho ligado ao lado de baixa tensão e dois conectores fêmeas para plugue banana ligados ao lado de alta tensão. O lado de alta tensão é enrolado com o fio de cobre esmaltado 44AWG e no lado de baixa tensão é utilizado o fio de cobre esmaltado 30AWG. Esse transformador vem sendo utilizado em medições de qualidade de energia por uma conceituada empresa do ramo [8].

2.3.2 Resultados Experimentais

Conforme mencionado anteriormente, o conversor utilizado no circuito é o “SEMIKRON IGBT MODULES SKM 75 GD 123 D” e suas principais características de interesse neste trabalho são o seu tempo de subida típico, que é de aproximadamente 60 ns, e a amplitude de tensão dos pulsos, que no circuito empregado é de aproximadamente 650 V. Demais informações podem ser obtidas em [9].

Com relação aos cabos de interligação entre o conversor e o motor, foram adotados cabos trifásicos com seção de 1,5 mm² com 20 m de comprimento. A utilização de um cabo com esse comprimento é inevitável devido ao fato de as partes do equipamento, do gerador e do tubo de raios-X (motor) necessitarem de temperaturas para resfriamento diferentes e, conseqüentemente, serem instaladas em salas diferentes. O valor de 20 m para o comprimento é o padrão para o aparelho em questão. O conjunto dos cabos é disposto no arranjo triangular, o qual apresenta velocidade de propagação do modo de seqüência positiva maior do que no arranjo planar [10].

Quanto ao motor, parte integrante do anodo giratório interno ao tubo de raios-X, este, por fazer parte do conjunto ou encapsulamento da ampola de emissão de radiação, não conta com muitas informações na documentação fornecida pelo fabricante. Porém, sabe-se, pela estrutura do conjunto, que este é um motor de indução de baixa potência que, conforme [10], apresenta impedância de estator muito maior que a impedância dos cabos, levando a um coeficiente de reflexão de tensão na faixa de 0,9 a 0,95.

Com o circuito montado, foram obtidas as formas de onda de tensão referentes aos pulsos de saída do inversor para as situações críticas de operação do circuito onde se verifica a ocorrência de falhas no aparelho. As formas de onda apresentadas nas Figuras 2.11 e 2.12 foram medidas na junção entre o cabo e os terminais do motor.

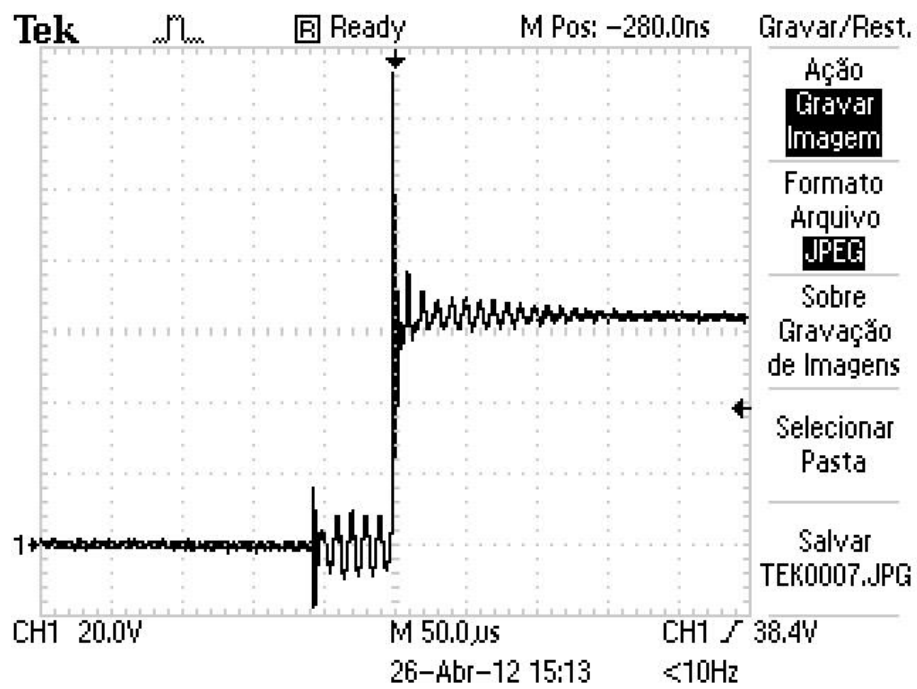


Figura 2.11 – Forma de onda de tensão referente ao chaveamento dos IGBT's obtida nos terminais do motor (amplitude em escala 10:1)

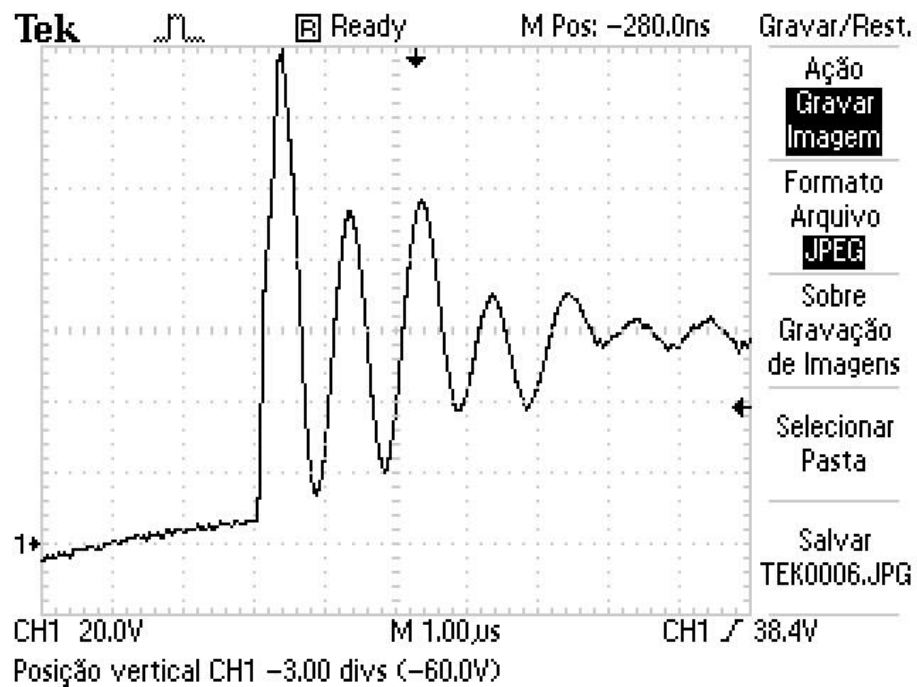


Figura 2.12 – Forma de onda de tensão referente ao chaveamento dos IGBT's obtida nos terminais do motor com ênfase nos primeiros picos de tensão (amplitude em escala 10:1).

Como se pode observar, as formas de onda ilustradas indicam a ocorrência de sobretensões consideráveis na faixa de 2 p.u.. Esta é, claramente, uma situação indesejável para a operação do motor de indução utilizado no anodo giratório de máquinas de raios-X. Sabe-se que a exposição de motores de indução por longos períodos de tempo a sobretensões com essas características pode levar a falhas operacionais e à fadiga da isolação. Estas sobretensões podem, inclusive, estar associadas ao mal funcionamento do aparelho de raios-X objeto de estudo desta monografia em determinadas condições de operação. A fim de melhor compreender a origem dessas sobretensões e de buscar possíveis ações de proteção, são apresentadas no próximo capítulo análises computacionais com o emprego de plataforma ATP que buscam reproduzir, de maneira simplificada, as condições de ensaios apresentados na presente seção.

3

Sobretensões nos Terminais de Motores de Indução Causadas por Pulsos PWM

3.1 Fundamentação Teórica da Modulação PWM

A utilização de conversores de frequência vem sendo o método mais eficiente para o controle da velocidade nos motores de indução. Com a utilização dos conversores, a tensão da rede, que possui amplitude e frequência constantes, é transformada em uma tensão de amplitude e frequência variáveis. Com a variação da frequência da tensão de alimentação, varia-se também a velocidade do campo girante e conseqüentemente a velocidade mecânica de rotação da máquina [11].

A utilização do conversor de frequência no controle da variação de velocidade do motor de indução proporciona partidas mais suaves, evitando danos ao sistema. No caso do equipamento de raios-X avaliado neste texto, o conversor PWM opera como uma interface entre a fonte de energia proveniente da rede de alimentação e o motor de indução ou anodo giratório.

A tensão e a frequência desejadas para o funcionamento do sistema de acionamento do motor de indução, nas diferentes velocidades, são obtidas por meio de três estágios básicos presentes no circuito:

- Ponte Retificadora – Retificação do sinal alternado com tensão e frequência constantes;

-
- Banco Capacitivo – Regulação da tensão retificada com armazenamento de energia por meio do banco de capacitores;
 - IGBT – Inversão da tensão contínua proveniente do banco capacitivo em um sinal alternado com tensão e frequência variáveis.

A forma de onda de tensão entregue pelo conversor de frequência ao motor de indução é composta por uma sucessão de pulsos de tensão de acordo com a frequência de chaveamento. Esses pulsos viajam através do cabo de conexão com uma determinada velocidade de propagação até atingirem o motor de indução. Como existe uma descontinuidade de impedância na interface entre o cabo e os terminais do motor, verifica-se a possibilidade de sobretensões neste ponto. Essas sobretensões estão associadas à criação de um pulso de tensão refletida com mesma polaridade do pulso incidente devido ao fato de a impedância do motor ser maior que a impedância do cabo. A tensão média aplicada ao motor é controlada pela largura dos pulsos e pelo tempo entre estes. A sobretensão aplicada ao motor torna-se mais crítica quando o tempo entre os pulsos é mínimo. Esta condição ocorre quando são necessárias elevadas tensões na saída e durante regimes transitórios, como aceleração e desaceleração do motor de indução [11].

3.2 Influência do Tempo de Subida do Pulso PWM

O tempo de subida do pulso gerado pelo chaveamento do inversor influencia diretamente no pico da tensão oscilatória presente nos terminais do motor de indução. O tempo de subida de uma chave condutora é definido como o tempo que a tensão aplicada leva para ir de 10% a 90% do seu valor de regime permanente [4]. Quanto menor for o tempo de subida, maior será o pico da oscilação nos terminais do motor para um mesmo comprimento de cabo [10]. Tal afirmação pôde ser comprovada através de simulações no ATP (*Alternative Transients Program*) considerando dois tempos de subida diferentes para uma mesma configuração do sistema. As Figuras 3.1 e 3.2 mostram a diferença entre os picos das oscilações para diferentes tempos de subida. Nestas simulações foram aplicados pulsos de tensão de 230 V no terminal emissor do cabo considerando-se o terminal receptor do cabo aberto. Para a representação do cabo foi utilizado um modelo com parâmetros distribuídos pré-existente no ATP, sendo arbitrada uma impedância de surto de 75Ω , uma velocidade de propagação de $1,5 \times 10^8$ m/s e um comprimento de cabo de 4 m. Na Figura 3.1 considera-se uma tensão aplicada com tempo de subida igual a 60 ns e, na Figura 3.2, supõe-se um tempo de subida igual a 600 ns.

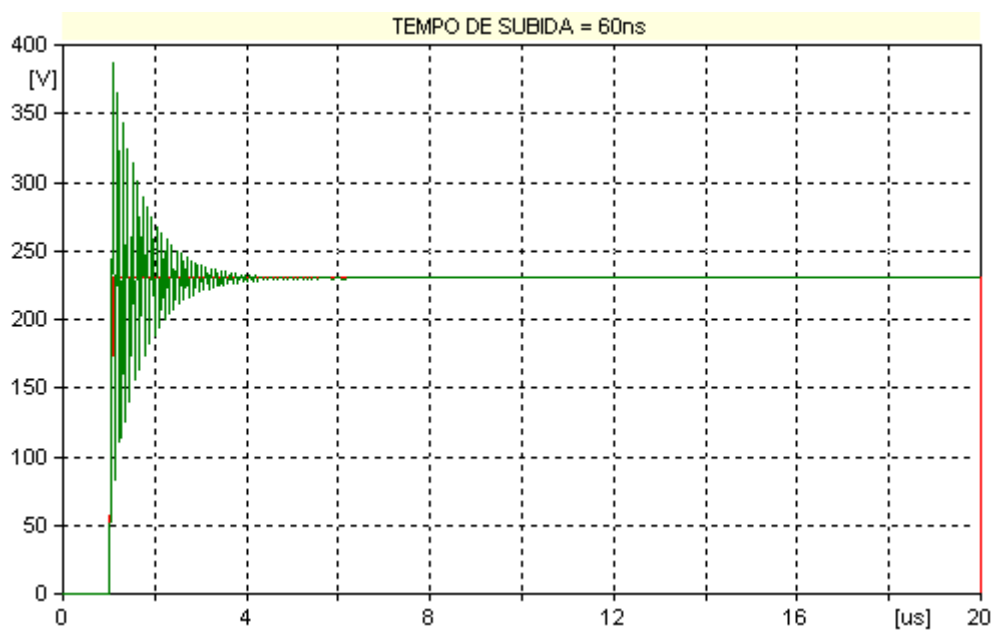


Figura 3.1 - Sobretensões transitórias geradas pelas reflexões de um pulso PWM nas extremidades do cabo. Em vermelho: pulso PWM na saída do inversor; em verde: tensão nos terminais do motor. Resultados simulados no ATP com o tempo de subida igual a 60 ns

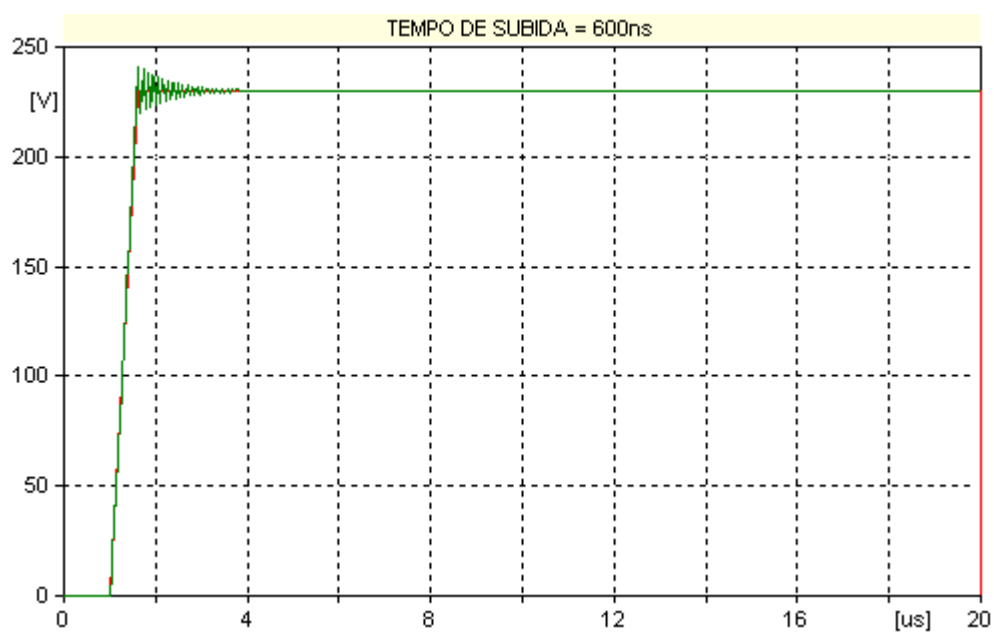


Figura 3.2 - Sobretensões transitórias geradas pelas reflexões de um pulso PWM nas extremidades do cabo. Em vermelho: pulso PWM na saída do inversor; em verde: tensão nos terminais do motor. Resultados simulados no ATP com o tempo de subida igual a 600 ns

Analisando as Figuras 3.1 e 3.2, verifica-se que o valor de pico da sobretensão para o tempo de subida menor (60 ns), para uma tensão aplicada de 230 V, atinge aproximadamente 380 V ou seja, aproximadamente 1.65 p.u., enquanto o valor de pico da sobretensão para o tempo maior (600 ns), atinge aproximadamente 240 V, ou seja, um pouco mais que 1.04 p.u.

Desta forma, torna-se fácil identificar a afirmação de que um tempo de subida muito rápido no pulso PWM aumenta consideravelmente o valor de pico da sobretensão oscilatória nos terminais do motor.

3.3 Relação Entre a Amplitude e a Frequência das Sobretensões Transitórias e o Comprimento Crítico do Cabo

Um parâmetro de interesse para a análise da propagação do pulso PWM nos cabos de alimentação de motores de indução é o comprimento crítico, definido como o comprimento mínimo de cabo necessário para uma reflexão plena do pulso PWM nos terminais do motor. A amplitude e a frequência das sobretensões transitórias nos terminais do motor estão, portanto, diretamente relacionadas ao comprimento crítico do cabo. Este parâmetro pode ser calculado como mostrado em [4,10], igualando-se o tempo de subida do pulso (t_s) a dois tempos de viagem (t_v) do pulso pelo cabo, obtendo-se:

$$t_s = 2.t_v \quad (2)$$

$$t_s = 2.l_c/v \quad (3)$$

$$l_c = (t_s.v)/2 \quad (4)$$

Onde:

- t_s = tempo de subida do pulso
- t_v = tempo de viagem do pulso no cabo
- l_c = comprimento crítico do cabo de interligação
- v = velocidade de propagação no cabo

Para compreender com maior clareza o conceito do comprimento crítico, é conveniente supor que o coeficiente de reflexão de tensão nos terminais do motor seja igual a 1. Nesse caso, assim que o pulso gerado pelo inversor chega ao terminal do motor após um tempo de viagem (t_v), este encontra uma impedância diferente e maior do que a impedância do cabo. Supondo um coeficiente de reflexão unitário, é gerada uma onda refletida com inclinação igual a do pulso

que a originou. Isso resulta em uma rampa de tensão com inclinação duas vezes maior do que a inclinação dos pulsos de tensão incidentes nos terminais do motor. Ao mesmo tempo em que a onda refletida no terminal do motor inicia seu crescimento, esta começa a se propagar em direção contrária da onda incidente, ou seja, em direção ao inversor. Após dois tempos de viagem, a onda refletida inicia o seu retorno para o motor após ser refletida no gerador, estando agora com o seu valor negativo caso a impedância interna do gerador seja desprezível. No entanto, como no caso do comprimento crítico o tempo de subida coincide com duas vezes o tempo de viagem, a tensão refletida positiva no terminal do motor já terá atingido 1 p.u. no exato instante em que a onda refletida negativa venha a subtrair a tensão do motor. Se essa onda demorar mais a chegar, a tensão permanece no patamar de 2 p.u. até que a onda negativa retorne ao motor. Portanto, para o caso em que a onda negativa chegue exatamente no momento em que a sobretensão atinge 2 p.u. no terminal do motor, o cabo estará com o seu comprimento igual ao comprimento crítico para o sistema em questão.

Diante da descrição acima, pode-se compreender que quanto menor for o tempo de viagem em relação ao tempo de subida, mais atenuada pela reflexão negativa será a sobretensão no terminal do motor. O coeficiente de reflexão pode ser calculado pela seguinte formulação:

$$\Gamma = (Z_m - Z_c) / (Z_m + Z_c) \quad (5)$$

Onde:

- Γ = Coeficiente de reflexão de tensão;
- Z_m = Impedância de entrada no motor na frequência equivalente ao pulso de tensão;
- Z_c = Impedância característica do cabo.

A fim de se demonstrar o efeito do comprimento crítico e ilustrar a relação entre o tempo de subida dos pulsos PWM e o tempo de trânsito do cabo na definição das sobretensões geradas nos terminais do motor, foram elaboradas simulações no ATP adotando as seguintes condições:

- $t_s = 2.t_v$;
- $t_s < 2.t_v$;
- $t_s > 2.t_v$;
- $t_s = 4.t_v$.

Nas Figuras 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 podem ser observadas as condições descritas acima.

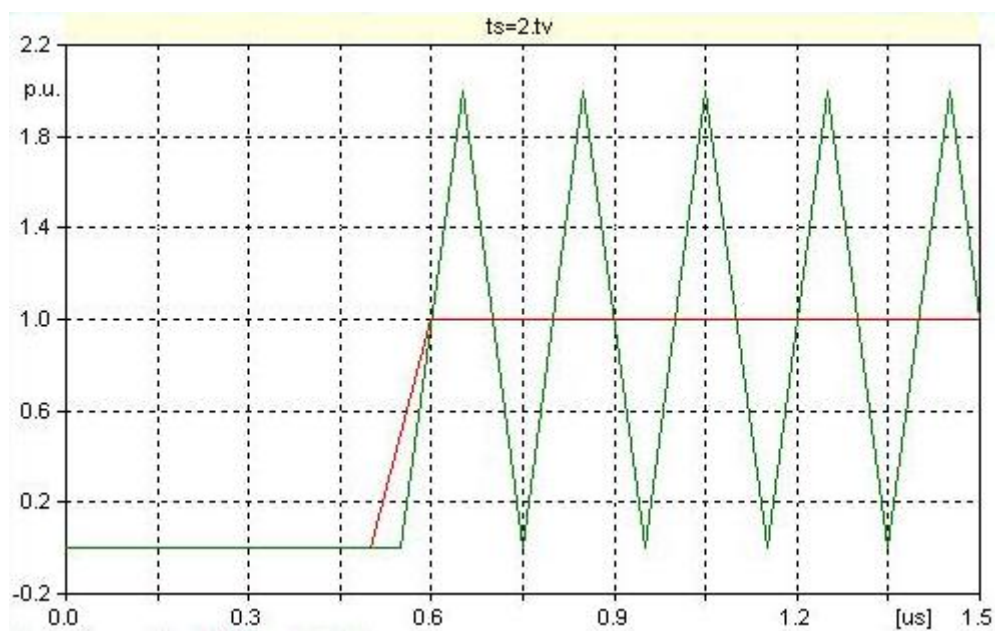


Figura 3.3 - Sobretensões transitórias para $t_s=2.t_v$. Em vermelho: pulso PWM na saída do inversor; em verde: tensão nos terminais do motor. Resultados simulados no ATP para o comprimento do cabo igual ao seu comprimento crítico.

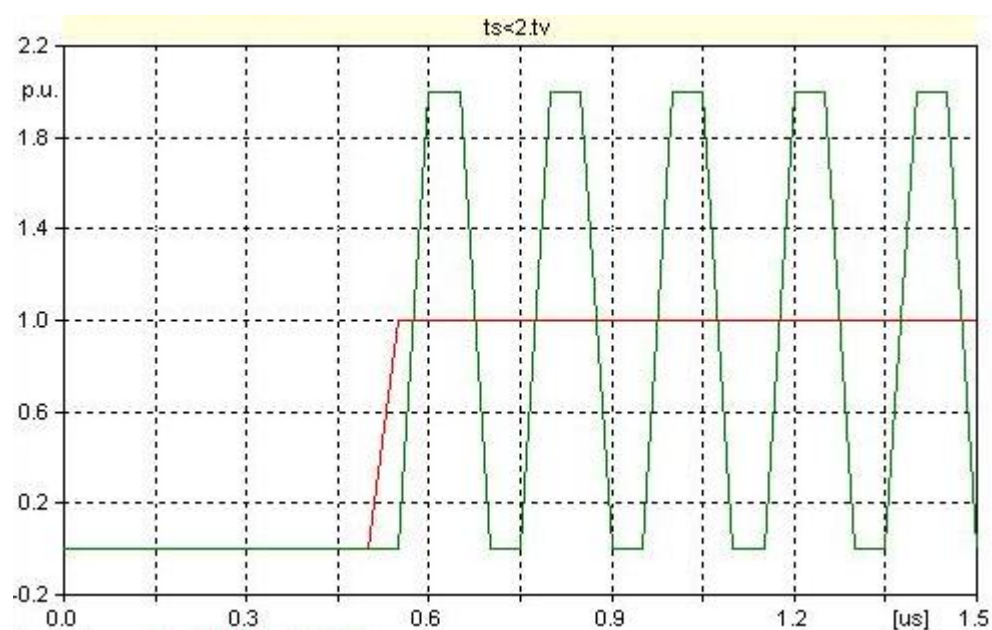


Figura 3.4 - Sobretensões transitórias para $t_s<2.t_v$. Em vermelho: pulso PWM na saída do inversor; em verde: tensão nos terminais do motor. Resultados simulados no ATP para o cabo estando com o seu comprimento uma vez e meia maior do que o seu comprimento crítico.

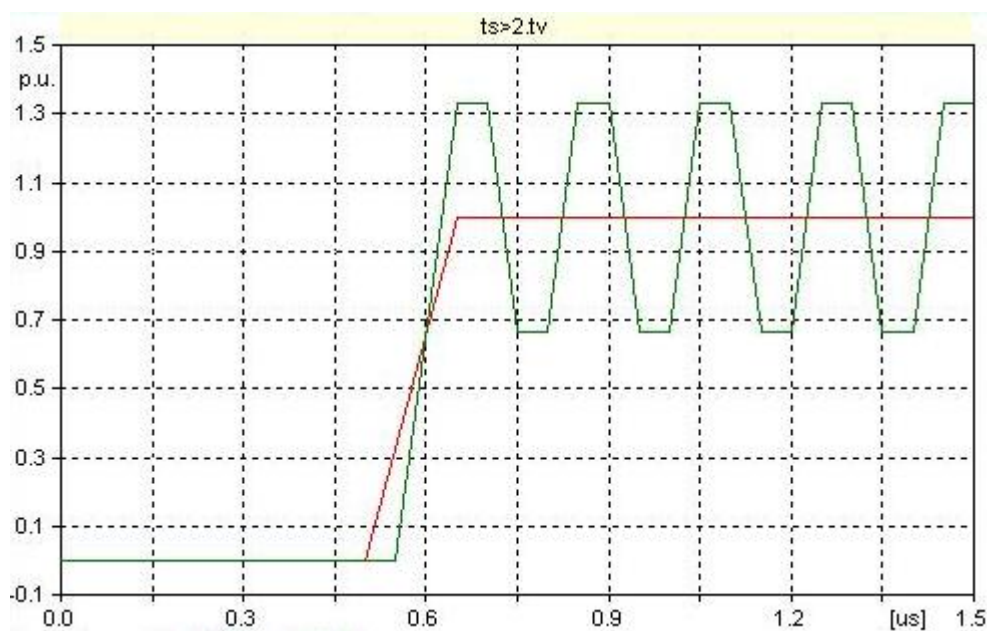


Figura 3.5 - Sobretensões transitórias para $t_s > 2.t_v$. Em vermelho: pulso PWM na saída do inversor; em verde: tensão nos terminais do motor. Resultados simulados no ATP para o cabo estando com o seu comprimento em 80% do comprimento crítico.

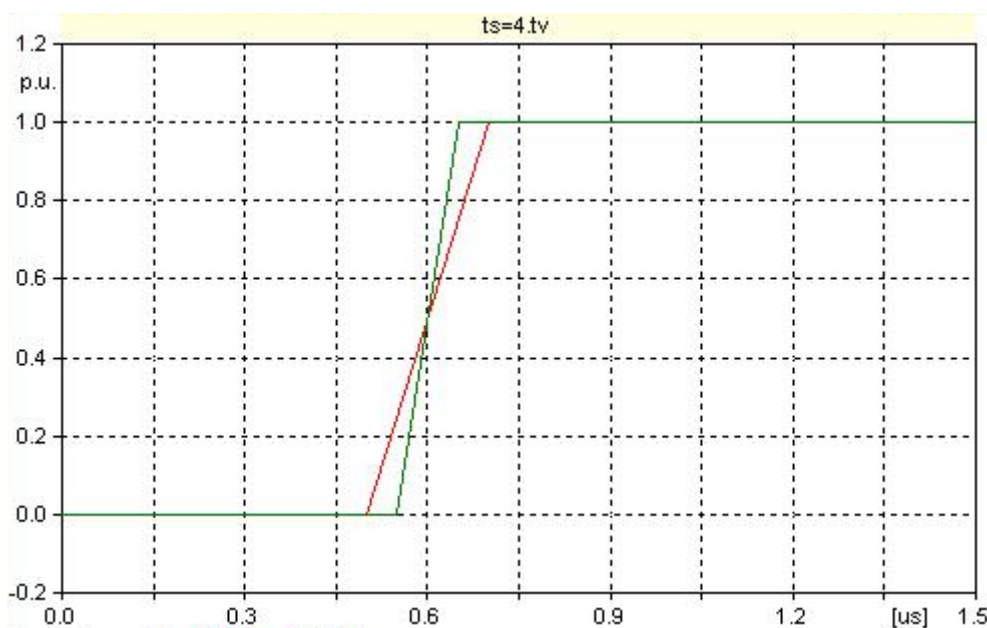


Figura 3.6 - Ausência das sobretensões transitórias para $t_s = 4.t_v$. Em vermelho: pulso PWM na saída do inversor; em verde: tensão nos terminais do motor. Resultados simulados no ATP para o cabo com metade do comprimento em relação ao comprimento crítico.

Através dos resultados apresentados nas Figuras 3.3 a 3.6, que apenas comprovam os estudos realizados em [4], pode-se considerar as seguintes condições para a ocorrência ou não de sobretensões nos terminais do motor, supondo-se coeficientes de reflexão próximos da unidade:

- $t_v < t_s/4 \rightarrow l_{cabo} < l_c/2 \rightarrow$ Não há sobretensão.
- $t_s/4 \leq t_v < t_s/2 \rightarrow l_c/2 < l_{cabo} < l_c \rightarrow$ Sobretensão entre 0 e 1 p.u.
- $t_v \geq t_s/2 \rightarrow l_{cabo} \geq l_c \rightarrow$ Sobretensão de 1 p.u.

No caso das sobretensões entre 0 e 1 p.u., pode-se ainda calcular a tensão no terminal do motor conforme apresentado em [12], utilizando-se a seguinte fórmula:

$$V_{mot} = 1 + (2.l_{cabo} \cdot \Gamma_{motor}) / (t_s \cdot v) \quad (6)$$

Onde:

- Γ_{motor} = coeficiente de reflexão na junção do cabo com o motor;
- l_{cabo} = comprimento do cabo.

Conclui-se, portanto, com as simulações apresentadas neste item, que o comprimento do cabo influi de forma significativa nas sobretensões desenvolvidas na conexão cabo/motor.

3.4 Efeitos da Corrente de Modo Comum

Em sistemas de alimentação e controle de motores de indução por pulsos PWM também são verificados problemas associados à circulação de correntes de modo comum. Estas correntes se originam devido à tensão de modo comum gerada pelo inversor. A capacitância distribuída existente no cabo de interligação entre o inversor e o motor, que é sucessivamente carregada e descarregada, gera uma corrente de alta frequência sobreposta à corrente do inversor. Esta atinge picos que podem acionar a atuação da proteção do inversor contra sobrecorrente, causando a interrupção no funcionamento do circuito.

Conforme descrito em [10], a tensão de modo comum gerada pelo inversor também excita os acoplamentos capacitivos entre os condutores e partes do motor à terra, produzindo manifestações oscilatórias de corrente de modo comum em cada dv/dt da tensão correspondente. Essas correntes se caracterizam como uma importante fonte de problemas ligados à interferência eletromagnética e danos aos motores. Outro fator importante com relação às correntes de terra é

o fato de quanto menor for o comprimento do cabo, maior é a sua amplitude para um motor aterrado [10].

Estes aspectos referentes às correntes indesejadas no sistema influenciam diretamente na vida útil dos motores e em paradas de sistemas, conforme já mencionado, por atuação da proteção contra sobrecorrentes.

4 Desenvolvimentos

4.1 Implementação do Modelo do Sistema Estudado no ATP

Neste capítulo é feita uma tentativa de se reproduzir as formas de onda de tensão medidas nos terminais do motor utilizado no aparelho de raios-X analisado neste texto, ilustradas e discutidas no capítulo 2. Para isso, foi necessário modelar no ATP o pulso PWM, o cabo de interligação e o motor de indução. Os modelos utilizados para os três componentes são apresentados nos itens 4.1.1 a 4.1.3.

4.1.1 Representação Computacional da Forma de Onda PWM

A representação da forma de onda de tensão do pulso PWM foi feita de forma simplificada no ATP utilizando-se uma fonte de tensão gerando pulsos na forma trapezoidal, com tempo de subida de 60 ns referente ao IGBT utilizado no circuito.

4.1.2 Representação Computacional do Cabo

Para a simulação do cabo foi utilizado o modelo JMARTI disponível na rotina LCC existente no ATP, sendo respeitadas as características do cabo e de seu ambiente de instalação, tais como: comprimento, raios interno e externo, localização sobre a superfície do solo e resistividade do solo aproximada para o concreto. Por simplicidade, adotou-se um modelo de cabo monofásico. Os valores adotados na simulação encontram-se listados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados referentes à simulação computacional do cabo.

Comprimento (m)	Raio interno (mm)	Raio externo (mm)	Resistividade do condutor/cobre ($\Omega.m$)	Resistividade do solo/concreto ($\Omega.m$)	Localização dos cabos
20 m	0,69	0,80	1,72e-8	50	Superfície

Para a permeabilidade e a permissividade relativas foram adotados valores médios encontrados na literatura, iguais a 1 e 3, respectivamente.

4.1.3 Representação Computacional do Motor

A simulação do motor é uma tarefa mais complexa, sendo necessária a correta representação das capacitâncias intrínsecas que, conforme discutido em [4,10], representam caminhos de baixa impedância para as componentes de alta frequência dos pulsos de tensão. Para uma simulação aproximada, porém confiável, do motor utilizado no sistema aqui apresentado, foi realizada uma pesquisa no sentido de se identificar valores típicos e modelos empregados com essa finalidade. O modelo representativo do motor de indução para estudos em alta frequência encontra-se ilustrado na Figura 4.1.

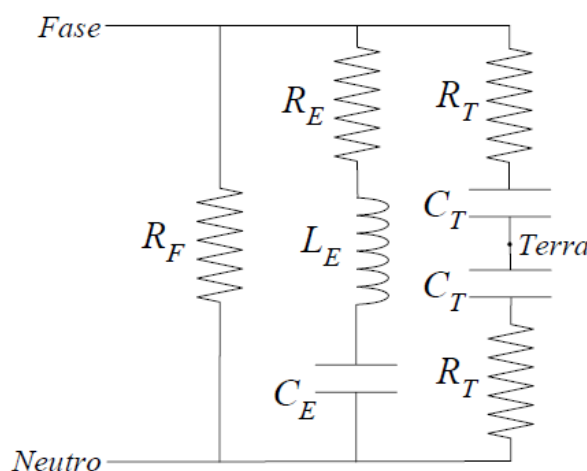


Figura 4.1 – Modelo representativo do motor de indução trifásico com os enrolamentos conectados em Y para estudos em alta frequência [4,13].

No modelo do motor de indução apresentado na Figura 4.1, tem-se uma malha RLC responsável pela captura dos fenômenos de alta frequência do motor. Segundo [4,13], as capacitâncias do enrolamento à terra e entre espiras são as mais significativas na representação de tais fenômenos. Ainda segundo [4,13], verificam-se as seguintes definições para os parâmetros do modelo: O parâmetro C_T representa a capacitância do enrolamento à terra. Já o parâmetro R_T é adicionado ao circuito para representar os efeitos dissipativos que ocorrem na estrutura do motor. O circuito formado pelos parâmetros R_E , L_E e C_E é responsável por capturar a segunda ressonância na resposta em frequência do motor, relacionada com a capacitância entre espiras. O parâmetro R_F é o responsável por contabilizar as perdas induzidas por correntes parasitas no núcleo magnético.

Segundo [4], a determinação destes parâmetros é conseguida através das medições das impedâncias fase-neutro e fase-terra do motor, no menor e no maior valor de frequência da faixa

que se deseja estudar. As equações para a determinação dos valores dos parâmetros descritos estão detalhadas em [13] para a faixa de frequência entre 1 kHz e 2 MHz.

O modelo do motor apresentado foi elaborado para motores de indução trifásicos com os enrolamentos conectados em Y. Para a simulação realizada neste trabalho, em virtude das características do motor de indução do tubo de raios-X, adotou-se este modelo representativo adaptado para um sistema monofásico com retorno pelo terra. Para isto, foi substituído o neutro pelo terra e eliminado o ponto de terra entre as capacitâncias devido ao interesse nas sobretensões de modo diferencial presentes nos terminais do motor. Conforme discutido acima, C_T representa a capacitância dos enrolamentos à terra, que é importante para representar efeitos de modo comum (que não serão analisados neste texto). O modelo representativo monofásico do motor de indução para estudos em alta frequência utilizado neste trabalho encontra-se ilustrado na Figura 4.2.

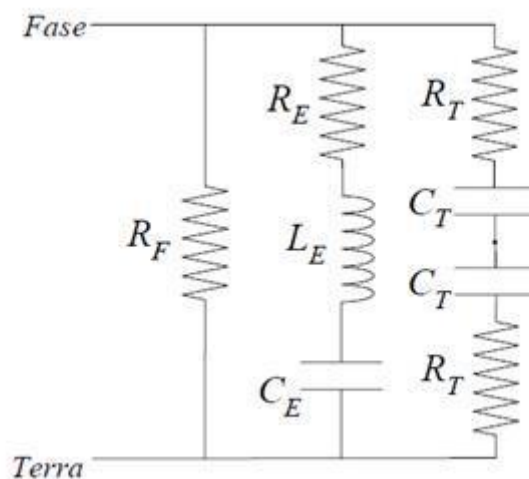


Figura 4.2 – Modelo representativo do motor de indução monofásico para estudos em alta frequência utilizado neste trabalho.

Com base na característica do motor aqui analisado, que possui baixa potência, foram utilizados os valores descritos na Tabela 2. Esses valores se baseiam nos parâmetros do motor de 2 cv apresentados em [13].

Tabela 2 – Parâmetros para a simulação do motor de indução no ATP para resposta em alta-freqüência (faixa de freqüência válida entre 1 kHz e 2 MHz).

Potência [cv]	Cg [pF]	Rg [Ω]	Ld [mH]	Re [kΩ]	Ct [pF]	Lt [mH]	Rt [kΩ]
2	290	15,3	5,1	3,9	29	0,27	0,324

4.2 Simulação e Comparações com os Resultados Experimentais

Após a definição e a modelagem do sistema no ATP, conforme diagrama ilustrado na Figura 4.3, foram obtidas as formas de onda nos terminais do motor. Estas estão ilustradas nas Figuras 4.4 e 4.5.

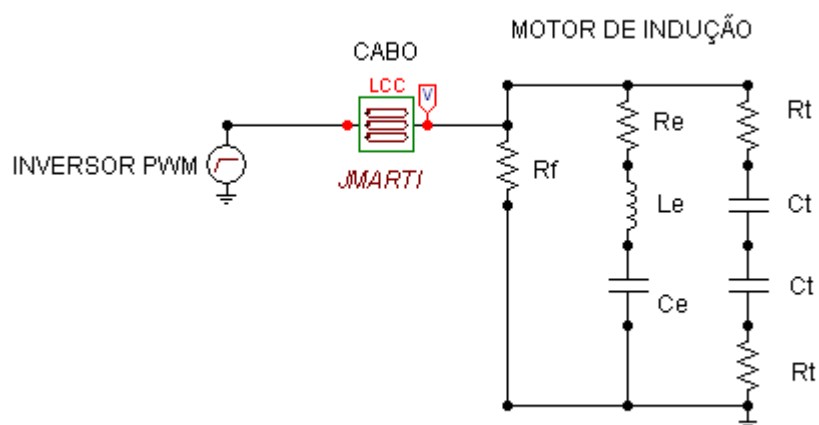


Figura 4.3 – Diagrama esquemático da simulação do circuito no ATP.

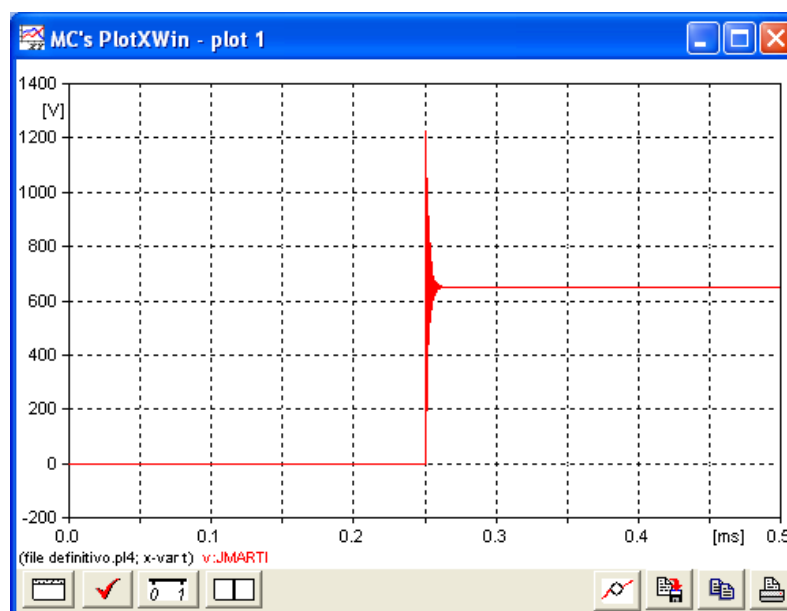


Figura 4.4 – Forma de onda de tensão simulada no ATP referente ao chaveamento dos IGBT's obtida nos terminais do motor

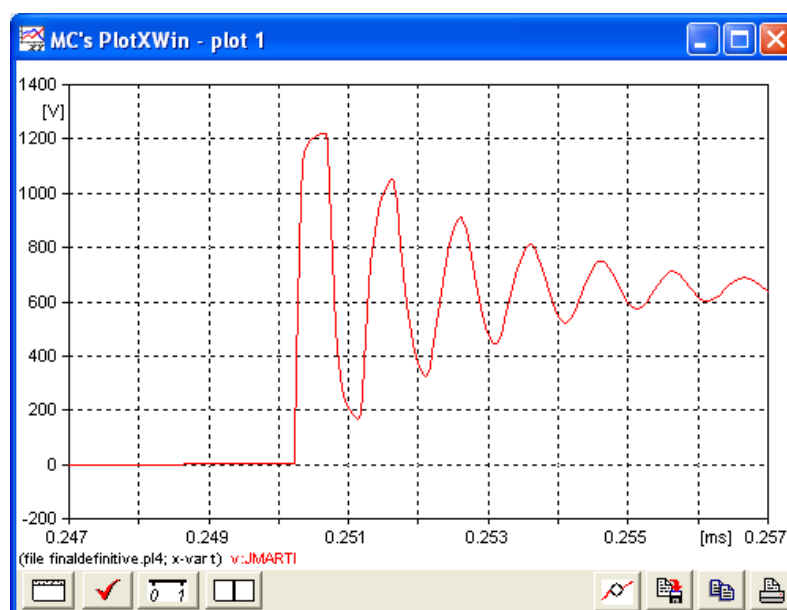


Figura 4.5 – Forma de onda de tensão simulada no ATP referente ao chaveamento dos IGBT's obtida nos terminais do motor com ênfase nos primeiros picos de tensão.

Através das simulações, que representam as características reais do circuito analisado, como o comprimento do cabo de 20 m e a tensão do pulso PWM, verifica-se que os resultados obtidos se mostraram próximos aos valores experimentais medidos em laboratório, conforme indicam as Figuras 4.6 e 4.7.

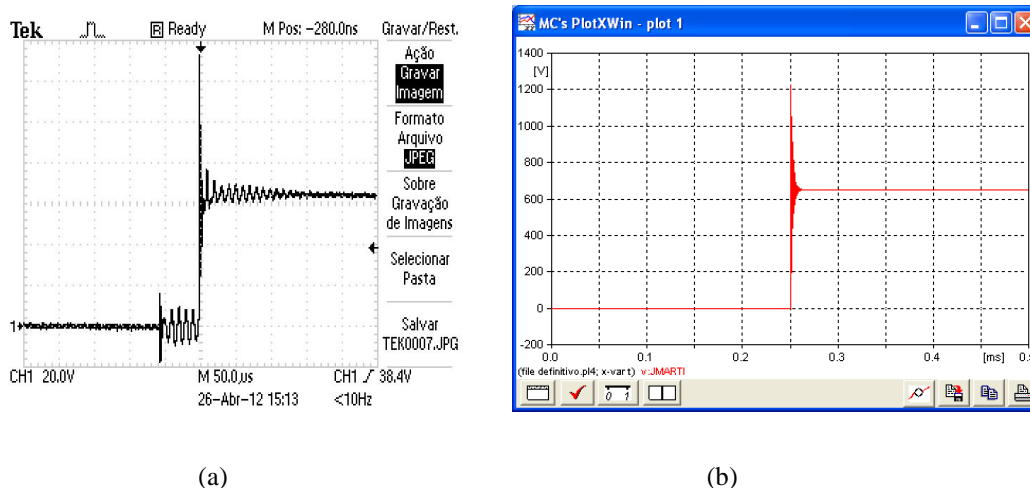


Figura 4.6 – Formas de onda nos terminais do motor (a) medição (amplitude em escala 10:1). (b) simulação.

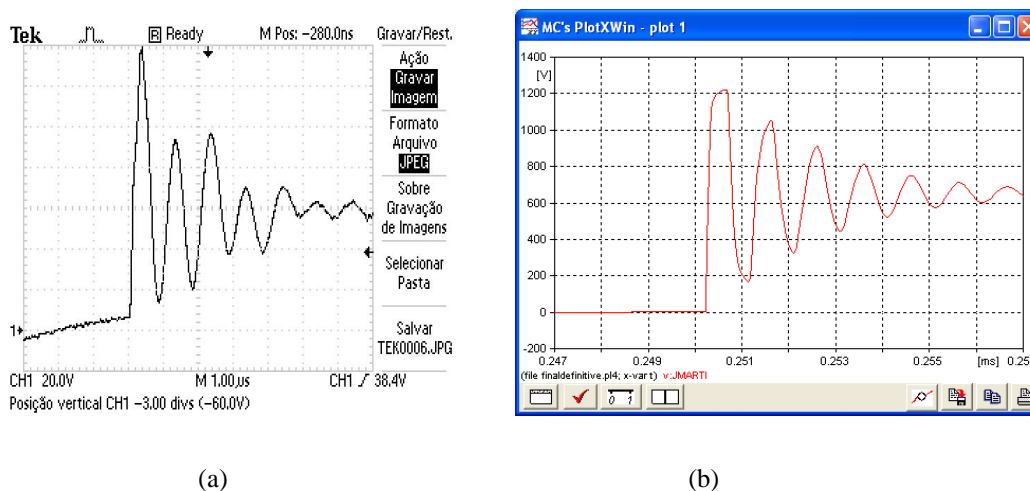


Figura 4.7 – Formas de onda nos terminais do motor com ênfase nos primeiros picos de tensão. (a) medição (amplitude em escala 10:1). (b) simulação.

Os resultados das simulações apresentados nas Figuras 4.6 e 4.7 estão representados em gráficos com mesma escala, considerando o transformador abaixador próprio para instrumentos de medição de 10 para 1, e mesma divisão de tempo dos dados experimentais medidos em laboratório. Comparando os resultados obtidos por simulação com os sinais medidos, e considerando as limitações referentes às informações sobre os parâmetros do cabo e do motor envolvido no sistema e ainda a influência do transformador abaixador e do osciloscópio nas medições, pode-se considerar os resultados obtidos bastante satisfatórios. Com isso, supõe-se que o modelo computacional utilizado seja suficientemente adequado para a análise dos efeitos de sobretensões no motor. Isso permite a sua utilização em investigações dedicadas à minimização dos efeitos das sobretensões oscilatórias causadas por pulsos PWM.

4.3 Discussão

Através dos resultados experimentais e computacionais obtidos, verifica-se de forma clara a ocorrência de sobretensões oscilatórias na junção cabo/motor. Também é possível constatar a importância da relação entre o comprimento do cabo e o tempo de subida dos pulsos PWM para a caracterização dessas sobretensões.

A frequência equivalente ao tempo de subida de um pulso PWM, discutida em [4,14], pode ser escrita como:

$$f_{EQ} = 1/(\pi.t_s) \quad (7)$$

Onde:

- f_{EQ} é a frequência equivalente ao tempo de subida do pulso,
- t_s é o tempo de subida do pulso.

Portanto, para o tempo de subida característico do IGBT utilizado no circuito, que é de 60 ns, tem-se $f_{EQ} = 5,3$ MHz. Para essa frequência, pode-se afirmar que a indutância da ponta de prova, conforme citado na seção 2.3.1, não afeta as medições, pois o resultado encontra-se abaixo de 10 MHz. A rigor, o modelo do motor utilizado só seria válido até a frequência de 2 MHz. No entanto, devido às diversas simplificações realizadas pode-se supor razoável a extensão da faixa de validade deste modelo até o valor indicado por f_{EQ} .

Diante das condições de variação da velocidade de propagação com a frequência, através de (4), pode-se verificar um comprimento crítico estimado na faixa de 6 a 8 m, que é muito menor do que o comprimento do cabo utilizado no sistema. Isso justifica a amplitude das sobretensões verificadas na junção cabo/motor conforme discutido no Capítulo 3.

Portanto, para efeito de análise das interferências envolvidas nas sobretensões na junção cabo/motor, verifica-se que o rápido tempo de subida e o comprimento relativamente grande do cabo em relação ao comprimento crítico para o sistema influenciam significativamente na amplitude das sobretensões oscilatórias.

A ocorrência de tais sobretensões pode submeter o isolamento do motor a elevados estresses de tensão, reduzindo sua vida útil [4]. Esse fenômeno pode ainda ser uma potencial causa das falhas de operação verificadas no motor utilizado no equipamento de raios-X estudado neste texto.

4.4 Ações Propostas

Para a tratativa do problema apresentado neste trabalho, referente às sobretensões oscilatórias nos terminais de um motor de indução causadas por sistemas de acionamento com inversores PWM, existem algumas medidas conhecidas na literatura. Entre estas, pode se citar a utilização de semicondutores com maiores tempos de subida na ponte inversora. Esse é o caso, por exemplo, de GTO's, que possuem tempo de subida típico de 2 μ s, possibilitando um comprimento crítico por volta de uma centena de metros, dependendo logicamente do cabo utilizado [4]. Outra solução seria a simples diminuição do comprimento do cabo para que se busque atender a condição em que o tempo de viagem do cabo seja aproximadamente 4 vezes menor do que o tempo de subida do pulso.

Com relação ao caso específico aqui apresentado, tais ações não são possíveis devido à inviabilidade de troca do inversor e também da necessidade da padronização do comprimento do cabo em 20 m. Tal situação motivou, através da simulação computacional, a busca de ações que permitissem a filtragem das frequências elevadas responsáveis pelos picos elevados de tensão verificados na junção cabo/motor. Para isto, foi utilizada a plataforma ATP.

Devido à impossibilidade de alteração dos componentes do sistema tema deste trabalho, houve a necessidade de se buscar uma solução alternativa para a minimização das sobretensões transitórias no terminal do motor. Dentre as soluções alternativas propostas na literatura torna-se mais viável a utilização de um filtro, restando decidir qual tipo seria mais apropriado para o problema aqui apresentado. Uma das soluções encontradas seria a utilização de um reator na saída do inversor para aumentar o tempo de subida do pulso. Porém, foi verificado que o reator nesta condição gera uma queda de tensão série na frequência fundamental, diminuindo a capacidade de produção de conjugado do motor. Outra situação seria a inserção de um reator série nos terminais do motor, porém esta alternativa também apresenta desvantagens semelhantes à da utilização o reator na saída do inversor [4].

Outra opção é a utilização de um filtro passa baixa na saída do inversor objetivando filtrar os componentes harmônicos de frequência elevada. No entanto, esta opção se apresenta a mais cara. Nesta mesma linha, há a opção da utilização do filtro passa baixa na entrada do motor, objetivando um coeficiente de reflexão próximo a zero, ou ainda a instalação de um capacitor em série com um resistor, com ambos colocados em paralelo aos terminais do motor, também tendo como objetivo a obtenção de uma impedância característica igual à da linha na faixa de frequências de interesse. Diante das opções citadas, esta última se mostrou a mais viável para o sistema em questão sendo escolhido um filtro de primeira ordem, constituído de

uma resistência em série com um capacitor. Essa opção foi considerada a melhor alternativa dentre as topologias analisadas [4] e, além disso, os pulsos de tensão decorrentes do emprego deste filtro tiveram os seus tempos de subida aumentados, reduzindo o dv/dt .

Após a análise das topologias, foram realizadas as simulações com a inserção do filtro RC de primeira ordem na junção cabo/motor. O diagrama esquemático da simulação do circuito no ATP e a comparação dos resultados das simulações com e sem filtro estão apresentadas, respectivamente, nas Figuras 4.8 e 4.9.

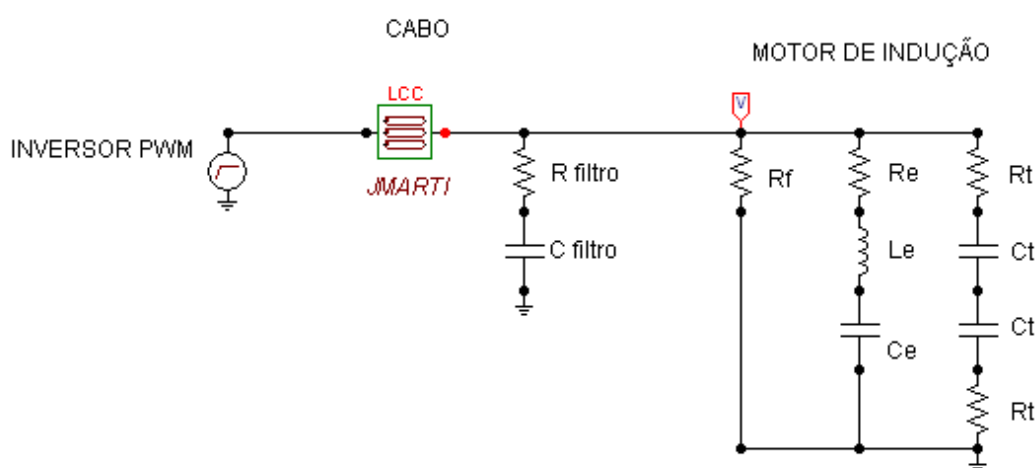


Figura 4.8 – Diagrama esquemático da simulação do circuito no ATP com o filtro RC nos terminais do motor.

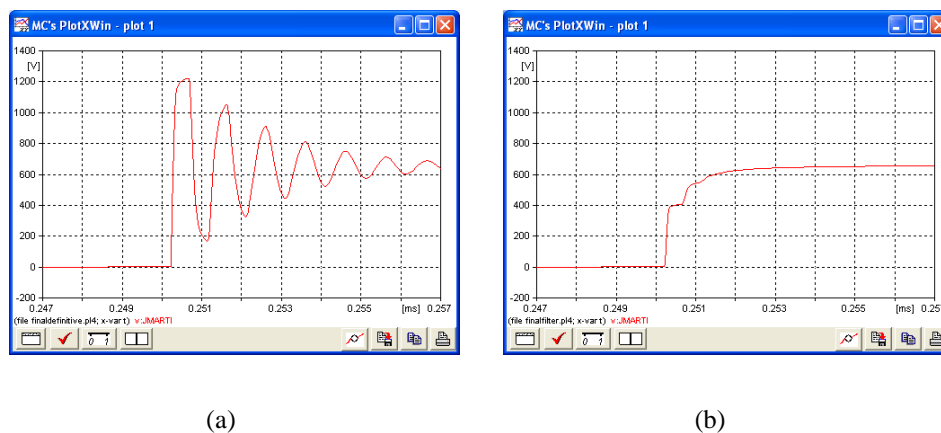


Figura 4.9 – Simulação no ATP das formas de onda nos terminais do motor. (a) sem filtro. (b) com filtro.

Conforme verificado na Figura 4.9 o resultado obtido com o filtro se mostra eficiente, sendo que a sua definição foi realizada escolhendo um resistor com valor ôhmico próximo ao valor típico da impedância característica do cabo na frequência das oscilações [4,15].

Com relação ao capacitor, foram realizados testes com vários valores até que se encontrasse a resposta desejada entre as perdas na frequência fundamental e as sobretensões em alta frequência. Os valores utilizados na simulação são $R = 75 \Omega$ e $C = 0,47 \mu\text{F}$, que levam a uma frequência de corte de 4,5 kHz.

As simulações computacionais apresentadas neste trabalho tiveram como objetivo representar com a maior fidelidade possível as condições reais das sobretensões existentes nos terminais do motor denominado anodo giratório, parte componente do tubo de raios-X. A partir da validação do modelo computacional implementado, buscou-se uma solução para a minimização das sobretensões através da utilização de um filtro RC na junção cabo/motor. Diante dos bons resultados obtidos com a inserção de um filtro nas simulações computacionais realizadas no ATP, tem-se como próxima meta implementar, no circuito real, a solução apresentada nesta seção.

5 Conclusões

No trabalho aqui apresentado, foram descritos os principais aspectos referentes às sobretensões transitórias no sistema de acionamento de um motor de indução alimentado por um inversor. O motor aqui utilizado, denominado anodo giratório, é parte integrante de um sistema de diagnóstico por raios-X. Diante das análises do fenômeno com base em medições realizadas em laboratório, foi proposto e validado um modelo computacional que foi implementado no ATP. Esse modelo foi em seguida utilizado na busca de soluções para o problema apresentado.

5.1 Conclusões

Através da análise dos principais fatores que influenciam na amplitude das sobretensões transitórias presentes nos terminais de um motor de indução causados por seu sistema de acionamento, como o tempo de subida do pulso PWM e a sua relação com o comprimento do cabo, foram realizadas medições em laboratório para a caracterização do problema. A partir da caracterização do fenômeno, foi implementado no ATP um modelo computacional com o objetivo de se criar uma ferramenta confiável para possibilitar a busca da mitigação das sobretensões nos terminais do motor de indução. Vale ressaltar que as sobretensões estressam o isolamento do motor, reduzindo sua vida útil, e também pode contribuir para o acionamento da proteção do circuito, causando interrupções no funcionamento do equipamento. Desta forma, a simulação computacional torna-se uma importante ferramenta em busca da minimização do tempo e do custo na busca de soluções para tais problemas.

Na literatura são encontrados diversos trabalhos referentes ao assunto. No entanto, devido à diversidade de aplicações encontradas para os sistemas de acionamento de motores através de inversores, tornam-se válidos estudos em diferentes condições de utilização da modulação PWM, salientando-se a variação da impedância característica de motores de mesma potência e a necessidade de uma correta representação computacional desses equipamentos. Neste contexto, o trabalho aqui apresentado contribuiu para o tema ao ilustrar, por meio de análises computacionais e medições realizadas em laboratório, o comportamento de um motor

de indução não convencional utilizado em equipamentos de raios-X quando submetido aos pulsos PWM utilizados em seu controle de velocidade.

Por fim, pôde-se avaliar a utilidade da simulação computacional para a tratativa do problema das sobretensões transitórias no circuito estudado, permitindo desta forma uma previsão de resultados quanto à utilização de filtros. Em particular, obteve-se um resultado positivo com a utilização de um filtro composto por um resistor em série com um capacitor, o qual se mostrou capaz de mitigar as sobretensões verificadas no terminal do motor. Ainda que não seja possível afirmar no presente momento que tais sobretensões sejam a causa das falhas operacionais verificadas no equipamento de raios-X objeto de estudo deste texto, espera-se que o emprego do filtro em questão possa contribuir para um aumento da robustez do sistema em foco. Caso também se resolvam os problemas operacionais verificados no equipamento, então será possível afirmar que estes problemas têm ou tinham como causa as sobretensões presentes na junção cabo/motor.

5.2 Proposta de Continuidade

Com a possibilidade da simulação computacional e através dela a obtenção de resultados positivos, cria-se uma nova etapa para a validação das soluções encontradas. Conforme descrito neste trabalho, foram obtidos resultados positivos com a utilização de um filtro RC colocado nos terminais do motor. Para a continuidade deste estudo e validação dos resultados obtidos, torna-se necessária a verificação dos valores atribuídos aos componentes quanto à existência dos mesmos no mercado e da viabilização da instalação destes no aparelho, sendo necessária a criação de suportes e novas tampas de acabamento para o sistema fonte do estudo. Desta forma, a validação dos resultados computacionais em termos práticos constitui uma fonte de novos estudos e análises compreendendo validações quanto à eletrônica e mecânica do sistema. Outro aspecto importante para uma continuidade do estudo aqui apresentado seria uma extensão da análise para os efeitos provenientes das correntes de modo comum e de terra, o que agregaria novas informações sobre as interferências presentes no sistema abordado e eventuais sobrecorrentes no circuito inversor.

Referências Bibliográficas

- [1] CATETERISMO CARDÍACO – BLOG L. SANTANA ACESSÍVEL EM:
<http://tecradiologiasantana.blogspot.com.br/2011/04/cateterismo-cardiaco.html#!/2011/04/cateterismo-cardiaco.html>
- [2] BALLOON ANGIOPLASTY AND STENTS – TEXAS HEART INSTITUTE ACESSÍVEL EM:
<http://www.texasheartinstitute.org/hic/topics/proced/angioplasty.cfm>
- [3] CATETERISMO CARDÍACO / ANGIOPLASTIA / STENT – MD. SAÚDE ACESSÍVEL EM:
<http://www.mdsaude.com/2010/12/cateterismo-cardiaco-angioplastia-stent.html>
- [4] DE PAULA, H., "Uma Nova Metodologia para a Determinação dos Fenômenos de Alta Freqüência em Sistemas de Acionamento de Motores de Indução através de Inversores PWM", Dissertação de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Novembro, 2005.
- [5] X-RAY TUBE ASSEMBLY AND INSTALLATION MANUAL – X-RAY PRODUCTS – VARIAN MEDICAL SYSTEMS.
- [6] HF SÉRIES GENERATORS COMPACT X-RAY UNIT – SERVICE MANUAL – TECHNICAL PUBLICATION.
- [7] BETULANI, C. A., “O Osciloscópio”, <http://www.if.ufrj.br/teaching/oscilo/intro.html>
- [8] 10:1 STEPDOWN ISOLATION TRANSFORMER – EDUARDO BOELART
- [9] DATASHEET IGBT SEMIKRON SKM 75GD123D ACESSÍVEL EM:
<http://www.igbts.net/downloadattachment/402881c21a564730011a5759aa9f0074/skm075gd123d.pdf>
- [10] DE PAULA, H., LISBOA, M. V. C., GUILHERME, J. F. R., BOAVENTURA, W. C., CHAVES, M. L. R., “Novas Contribuições ao Estudo das Sobretensões Transitórias e Corrente de Modo Comum Em Sistemas de Acionamento de Motores por Inversores”, VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, 2008 , Poços de Caldas, Brasil, 17 a 28 de Agosto.
- [11] MOTORES DE INDUÇÃO ALIMENTADOS POR CONVERSORES DE FREQUÊNCIA PWM – RICHARD MAGDALENA STEPHAN – COPPE/UFRJ ACESSÍVEL EM:
http://www.coe.ufrj.br/~richard/Acionamentos/motores_de_inducao_alimentados_por_conversores_de_frequencia_PWM.pdf
- [12] JOUANNE, A. V., ENJETI, P. N., “Design Considerations for an Inverter Output Filter to Mitigate the Effects of Long Motor Leads in ASD Applications”, IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 33, n. 5, pp1138-1145, 1997.

-
- [13] MOREIRA, A. F., LIPO, T. A., GIRI VENKATARAMANAN AND STEFFEN BERNET, “**High-Frequency Modeling for Cable and Induction Motor Overvoltage Studies in Long Cable Drives**”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 38, NO. 5, SEPTEMBER/OCTOBER 2002.
- [14] SKIBINSKI, G. L., KERKMAN, R. J., LEGGATE, D., PANKAU, J., SCHLEGEL, D., “**Reflected Wave Modeling Techniques for PWM AC Motor Drives**”, IEEE 13TH APEC, vol. 2, pp. 1021-1029, February 1998.
- [15] ZHONG, E., LIPO, T. A., ROSSITER, S., “**Transient Modeling and Analysis of Motor Terminal Voltage on PWM Inverter-Fed AC Motor Drives**”, IEEE 33RD IAS Annual Meeting, vol. 1, pp. 773-780, October 1998.
- [16] DE CONTI, A., “**Notas de Aula do Curso de Interferência Eletromagnética**”, CESEP, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, 2/2011.
- [17] BOGLIETTI, A., CARPANETO, E., “**An Accurate High Frequency Model of AC PWM Drive Systems for EMC Analysis**”, (C) 2001 IEEE, PP 1111-1117.
- [18] GUIA TÉCNICO WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A, MOTORES DE INDUÇÃO ALIMENTADOS POR INVERSORES DE FREQUÊNCIA PWM, WWW.WEG.NET
- [19] MELFI, M. J., “**Low-Voltage PWM Inverter-Fed Motor Insulation Issues**”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol.42.
- [20] PAUL, C. R., “**Introduction to Electromagnetic Compatibility**”, Second Edition, Copyright # 2006 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.
- [21] ZEVZIKOVAS, M., “**Efeitos da Interferência Eletromagnética Conduzida em Equipamentos Eletromédicos no Ambiente Hospitalar**”, Dissertação de Mestrado, Orientador: Sérgio Santos Mühlen, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2004.
-