

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA ÊNFASE
EM QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Caracterização de Fenômenos de Alta Freqüência em Sistemas de
Acionamento de Processos de Tratamento de Minério

Por

Alexandre Patrick Cordeiro Alves

Monografia de Final de Curso

Prof. Helder de Paula

(Orientador)

Belo Horizonte, 05/2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA ÊNFASE
EM QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Caracterização de Fenômenos de Alta Freqüência em Sistemas de
Acionamento de Processos de Tratamento de Minério

Alexandre Patrick Cordeiro Alves

Orientador: Prof. Helder de Paula

Monografia submetida à banca examinadora designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Certificado de *Especialista em Sistemas de Energia Elétrica com ênfase em Qualidade da Energia Elétrica*

Belo Horizonte, 05/2012

Caracterização de Fenômenos de Alta Freqüência em Sistemas de Acionamento de Processos de Tratamento de Minério

Alexandre Patrick Cordeiro Alves

Monografia submetida à banca examinadora designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Certificado de *Especialista em Sistemas de Energia Elétrica com ênfase em Qualidade da Energia Elétrica*

Aprovada em _____ de _____ de _____.

Por:

Prof. Helder de Paula
(Orientador)

Prof. Braz de Jesus Cardoso Filho
(Relator)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me guiou até aqui.

Agradeço muito ao professor Helder de Paula, pela dedicação, conselhos e auxílio, sem o qual esta conquista não seria possível.

Gostaria de agradecer também a toda minha família, pela compreensão, ajuda e incentivo.

Enfim, agradeço a todos que de uma maneira ou outra me ajudaram a alcançar este objetivo.

RESUMO

Este trabalho tem como objeto de estudo os diversos fenômenos de alta frequência que se fazem presentes em motores alimentados por conversores de frequência PWM, como (i) sobretensões transitórias nos terminais da máquina, (ii) correntes de modo diferencial que circulam no cabo e (iii) correntes de modo comum que fluem pelo sistema de aterramento.

Neste contexto, o objetivo desta monografia é o de caracterizar tais problemas em sistemas de acionamento presentes em atividades de mineração e pelotização, indicando dentre outros aspectos sua severidade. Para isso foram selecionados, e posteriormente simulados, sistemas de acionamento reais presentes nos processos de tratamento de minério, cujas características apontassem em potencialmente maior severidade no tocante aos problemas supracitados, como aqueles que utilizam cabos de maior extensão. Além disso, foram relatados os processos no quais tais motores trabalham, descrevendo os equipamentos acionados pelos mesmos e as funções que estes equipamentos desempenham dentro do processo.

Para elaboração das simulações, foi realizada uma modelagem completa dos sistemas elétricos selecionados, na qual todas as características dos mesmos foram detalhadas e reproduzidas, como (i) aterramento (ou não) do transformador, (ii) as características do conversor de frequência e dos filtros utilizados, (iii) o tipo, arranjo geométrico e forma de instalação dos cabos de alimentação e, por fim, (iv) as características do motor e do sistema de aterramento.

Com a implementação de plataforma computacional, o sistema foi então simulado e a presença e severidade dos fenômenos de alta frequência em foco foi avaliada.

ABSTRACT

This work has as its object of study the various phenomena of high-frequency which are present in PWM motor drives, such as (i) transient overvoltages in the terminals of the machine, (ii) differential mode currents circulating by the cables and (iii) common mode currents that flow through the grounding system.

In this context, the objective of this work is to characterize these systems drive problems present in the activities of mining and pelletizing, indicating, among other things, their gravity. To achieve this goal, was selected and subsequently simulated, a real drive system present in mining processes, whose features presents potentially higher severity problems as mentioned above, such as those that uses larger extension cables. Also have been reported processes in what these motors operate, describing the equipment powered by them and the functions they perform within the process.

For carry out the simulations, a complete modeling of the selected electrical systems was made, in which all characteristics were detailed and reproduced, as (i) grounding (or not) of transformer, (ii) the characteristics of frequency converter and the filters used, (iii) the type, the geometric arrangement and form of installation of power cables and, finally, (iv) the characteristics of the motor and grounding system.

With the implementation of computational platform, the system was simulated and the presence and severity of high-frequency phenomena in focus was evaluated.

LISTA DE FIGURAS

2.1 – Sobretensões geradas pela reflexão dos pulsos PWM nas extremidades do cabo. Em vermelho: pulso de tensão PWM na saída do conversor; em azul: tensão nos terminais do motor, Ilustração extraída de [3].....	15
2.2 – Circulação das correntes de alta frequência em um sistema de acionamento PWM.....	18
2.3 – Tensões entre fase e ponto médio do barramento C.C. (V_a , V_b e V_c) geradas pelo conversor PWM e a tensão resultante entre neutro e terra (V_n-t), figura extraída de [1].....	19
2.4 – Curva superior: tensões no início (em preto) e no final do cabo (em azul). Curva inferior: corrente de modo comum medida no aterramento da fonte cabo de 80 metros, arranjo triangular).....	20
3.1 – Fluxograma do Processo de Mineração, figura extraída de [10].....	27
3.2 – Fluxograma do Processo de Pelotização.....	28
3.3 – Moinho de bolas.....	29
3.4 – Filtro de Disco a Vácuo.....	31
3.5 – Discos Pelotizadores.....	32
3.6 – Recuperadora.....	34
4.1 – Diagrama Unifilar do Sistema 1.....	37

4.2 – Configuração do cabo Eprotenax Gsette da Prysmian,utilizado para alimentação de conversores de frequência 480V [www.prysmian.com.br].....	39
4.3 – Esquema de aterramento do Sistema 1.....	41
4.4 – Diagrama Unifilar do Sistema 2.....	46
4.5 – Esquema de aterramento do Sistema 2.....	49
5.1 – Variação da indutância (a) e da resistência (b) com a frequência. Curva em vermelho: modelagem com 6 ramos. Curva em verde: modelagem com 5 ramos.....	57
5.2 – (a): Erros percentuais da indutância para 5 ramos (curva verde) e para 6 ramos (curva vermelha). (b): Zoom da figura da esquerda, ressaltando os erros percentuais para frequências mais baixas.....	57
5.3 – (a): Erros percentuais da resistência para 5 ramos (curva verde) e para 6 ramos (curva vermelha). (b): Zoom da figura da esquerda, ressaltando os erros percentuais para frequências mais baixas.....	58
5.4 – (a) Corrente da fase "a" do cabo, em curto-circuito: Curva em azul, referente ao modelo com 5 ramos utilizado para a impedância série do cabo; Curva em vermelho, referente ao modelo em que os parâmetros série correspondem exatamente à frequência de 1 MHz. (b) Zoom.....	61
5.5 – (a) Corrente de modo comum, cabo em aberto: Curva em azul, referente ao modelo com 5 ramos utilizado para a impedância série da terra; Curva em vermelho, referente ao modelo em que os parâmetros série correspondem exatamente à frequência de 1 MHz. (b) Zoom.....	61

5.6 – Circuito equivalente para o transformador empregado na análise de fenômenos de alta frequência, figura extraída de [16].....	65
5.7 – Circuito equivalente para o motor empregado na análise de fenômenos de alta frequência, figura extraída de [15].....	65
5.8 – Ensaio para medir a impedância de modo comum do transformador.....	66
5.9 – Tensão na saída do inversor (início do cabo), em preto, e nos terminais do motor (final do cabo), em azul.....	68
5.10 – Tensão de modo comum nos terminais do motor e corrente de modo comum do motor (fluindo de sua carcaça para o ponto de aterramento).....	69
5.11 – Tensão de modo comum nos terminais do inversor e corrente de modo comum total do sistema (combinação das correntes que retornam pelo trafo e pelo conversor).....	69
5.12 – Curva superior: corrente retornando pelo transformador / curva inferior: corrente retornando pelo acoplamento capacitivo do inversor.....	70
5.13 – Corrente de carga do cabo.....	70
5.14 – Corrente que flui dos condutores para a terra.....	71
5.15 – Tensão na saída do inversor (início do cabo), em preto, e nos terminais do motor (final do cabo), em azul.....	73
5.16 – Tensão de modo comum nos terminais do inversor (preto) e do motor (azul).....	74

5.17 – Corrente de modo comum do motor (fluindo de sua carcaça para o ponto de aterramento).....	74
5.18 – Corrente de modo comum total do sistema (combinação das correntes que retornam pelo trafo e pelo conversor).....	75
5.19 – Curva superior: corrente retornando pelo transformador / curva inferior: corrente retornando pelo acoplamento capacitivo do inversor.....	75
5.20 – Corrente de carga do cabo.....	76
5.21 – Corrente que flui dos condutores para a terra.....	76

LISTA DE TABELAS

4.1 – Resumo dos dados dos equipamentos do sistema 1.....	43
4.2 – Resumo dos dados dos equipamentos do sistema 2.....	51
5.1 – Valores das grandezas de seqüência calculados a partir das matrizes de impedância e de admitância fornecidas pela rotina “cable constants” do ATP.....	59
5.2 – Valores dos parâmetros utilizados nos circuitos equivalentes do motor e do transformador no sistema de acionamento em foco.....	67

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução	11
Capítulo 2 – Considerações sobre os Fenômenos de Alta Freqüência	13
2.1 – Sobretensões Transitórias.....	13
2.2 – Correntes de Alta Freqüência em acionamentos PWM.....	18
2.3 – Métodos para a Minimização das Sobretensões e Correntes de Modo Comum.....	22
Capítulo 3 – Descrição do Processo de Mineração/ Pelotização	24
3.1 – Processo de Mineração.....	24
3.2 – Processo de Pelotização.....	28
Capítulo 4 – Descrição dos Sistemas	35
4.1 – Sistema 1 (Simulado): Motor de baixa tensão, potência de 100 cv, cabo 1x3C 120 + 1C 70 mm ² de 480 metros.....	36
4.2 – Sistema 2 (Não simulado): Motor de Média Tensão, potência de 2000cv, cabo 3x1C 120 mm ² de 550 metros.....	45
Capítulo 5 – Modelagem e Simulação do Sistema 1	53
5.1 – Modelagem do cabo de interligação entre conversor e motor.....	54
5.2 – Modelagem do conversor de freqüência.....	62
5.3 – Modelagem do transformador e do motor.....	62
5.4 – Resultados obtidos das simulações.....	68
5.4.1 – Resultados da simulação do sistema sem a utilização do reator na saída do conversor e sem resistor de aterramento no neutro do transformador.....	68
5.4.2 – Resultados da simulação do sistema com a utilização do reator na saída do conversor e com resistor de aterramento no neutro do transformador.....	73

Capítulo 6 – Conclusão	79
Capítulo 7 – Referências Bibliográficas	81

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, os conversores de frequência têm sido largamente utilizados em processos industriais, visto que proporcionam o controle preciso da velocidade dos motores de indução, o que é requerido em diversas aplicações. Além disso, a utilização dos conversores possibilita também economia de energia e partida suave de motores, dentre outros benefícios. O largo crescimento de seu uso tornou-se possível devido à grande evolução tecnológica e redução de custos das fontes eletrônicas chaveadas do tipo PWM (Modulação por Largura de Pulso).

Em seu princípio, a utilização dos conversores de frequência trouxe alguns problemas, como a geração de harmônicos de baixa ordem em sua tensão de saída, que aumentam as perdas nos motores, sobreaquecimento das máquinas quando operando em baixas rotações e produção de conjugados oscilatórios, além de outros problemas. Com a utilização do chaveamento PWM e da contínua elevação da sua frequência de chaveamento, tais problemas foram superados, embora outros, de alta frequência, tenham passado a se manifestar.

Os fenômenos de alta frequência existentes em motores acionados por conversores de frequência ocorrem em função das elevadas taxas de variação de tensão relacionadas aos rápidos tempos de subida e descida dos pulsos, que ocorrem em elevadas frequências [1]. Esse chaveamento rápido pode ocasionar sobretensões nos terminais do motor, além de geração de correntes transitórias de modo comum e de modo diferencial, as quais serão estudadas neste trabalho.

Tais fenômenos são mais pronunciados em sistemas que possuem cabos de grande comprimento, situação comum em processos de extração e tratamento de minérios. Dentro deste contexto foram selecionados dois sistemas, um composto por um motor de baixa tensão e outro por um motor de média tensão, que operam em uma planta real de tratamento de minério. Entretanto, a simulação para caracterização dos fenômenos de alta frequência e seu nível de severidade foi realizada apenas para o motor de baixa tensão, sendo que as informações referentes

ao motor de média tensão foram aqui descritas apenas como referência para estudos futuros.

Sendo assim, este trabalho alerta para um fato recorrente em várias plantas industriais, que é a desconsideração dos fenômenos de alta frequência durante as fases do projeto e instalação do sistema, sendo que tal descuido pode ocasionar em redução da vida útil do isolamento e dos rolamentos do motor, desligamentos intempestivos do sistema e interferência eletromagnética, além de todos os prejuízos financeiros associados.

Com o intuito de abordar tais questões, o presente trabalho foi estruturado da seguinte maneira:

2. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS FENÔMENOS DE ALTA FREQUÊNCIA

As fontes eletrônicas mais utilizadas para o acionamento dos motores de indução são as do tipo PWM (Modulação por Largura de Pulso). Tal tecnologia utiliza IGBT's, que possuem menores tempos de subida ("rise time") e que, devido às elevadas frequências de chaveamento com as quais operam, geram uma forma de onda de tensão mais próxima da senoidal, com a ausência de harmônicos de baixa ordem e menor conteúdo harmônico total. Porém, conforme já mencionado, tais fontes resultam em diversos problemas de natureza transitória, os quais encontram-se detalhados na seqüência.

2.1 Sobretensões Transitórias

As sobretensões transitórias ocorrem em sistemas que utilizam cabos longos para a interligação do conversor ao motor, situação na qual tais cabos têm comportamento similar aquele observado na energização de uma linha de transmissão. Devido o fenômeno de propagação e reflexão de ondas, tem-se que a cada pulso gerado pelo conversor, ocorrerá uma sobretensão nos terminais do motor, cuja amplitude é função do coeficiente de reflexão da onda, o qual depende da diferença da impedância do cabo e do motor. O valor do coeficiente de reflexão é dado por:

$$Kr = \frac{Zm - Zc}{Zm + Zc}$$

Onde:

- Kr é o coeficiente de reflexão;
- Zm é a impedância do motor;
- Zc é a impedância do cabo.

Analisando a expressão acima, é fácil verificar que quanto maior for a diferença entre a impedância do motor e a impedância do cabo, maior será o coeficiente de

reflexão, e por conseqüência, maior será o valor da sobretensão nos terminais do motor.

Em motores menores, tem-se que a impedância dos mesmos é muito maior que a impedância do cabo alimentador, o que acarreta em um coeficiente de reflexão próximo à unidade. Isto significa que a tensão refletida tem a mesma amplitude e fase da tensão incidente, e então a tensão resultante nos terminais do motor tende a dobrar ($V_p = 2$ p.u.). Em máquinas maiores, a diferença entre a impedância dos motores e a impedância dos cabos é menor, ocasionando em coeficientes de reflexão menores, que giram na faixa de 0,6 [2].

Analisando o comportamento de uma onda em uma linha de transmissão, tem-se que, conforme já mencionado, as reflexões ocorrem sempre que um pulso de tensão experimenta uma variação na impedância característica da linha na qual se propaga, que no caso é a junção entre o cabo alimentador e o motor. As reflexões ocorrem da seguinte maneira: o pulso de tensão gerado pelo conversor atinge o motor, após um período considerado como um tempo de viagem, onde há alteração da impedância característica e uma onda é refletida para o conversor. Durante o tempo em que a onda refletida está indo em direção ao conversor, a tensão nos terminais do motor cresce em rampa com uma inclinação duas vezes maior (onda incidente + onda refletida). A onda refletida se propaga para o conversor, onde sofre nova reflexão, e após dois tempos de viagem, retorna ao motor com valor negativo e subtrai a tensão do mesmo. Deste modo, conclui-se que se o comprimento do cabo for muito grande e a onda refletida pelo conversor demorar muito tempo para chegar ao motor, a tensão nos terminais deste motor poderá crescer até atingir o patamar de 2 pu.

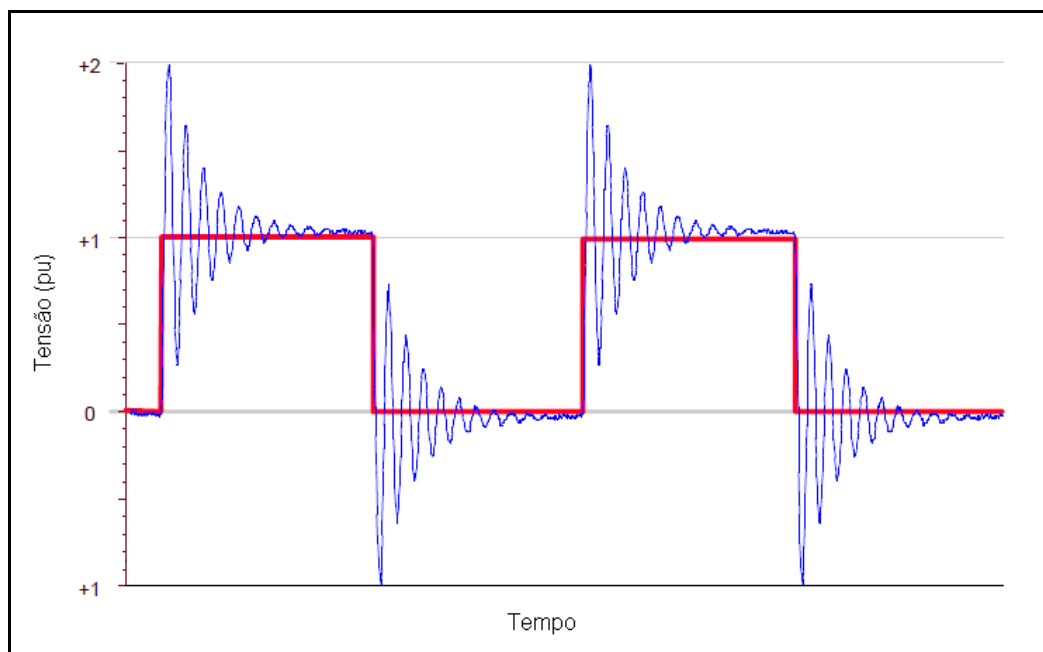


Figura 2.1 – Sobretensões geradas pela reflexão dos pulsos PWM nas extremidades do cabo. Em vermelho: pulso de tensão PWM na saída do conversor; em azul: tensão nos terminais do motor, Ilustração extraída de [3]

Uma observação importante que se pode fazer é que, caso as oscilações geradas por um pulso não tiverem sido totalmente amortecidas até que o próximo pulso chegue ao motor, haverá a sobreposição dos mesmos, podendo ocorrer sobretensões superiores a 2 pu.

Os fatores predominantes para a incidência de sobretensões nos terminais do motor alimentado por conversor são o tempo de subida do pulso de tensão (rise time) e o comprimento do cabo. Tem-se que quanto menor for o tempo de subida do pulso, menor é o comprimento de cabo necessário para que as sobretensões ocorram. Define-se como “comprimento crítico” o comprimento mínimo de cabo necessário para a ocorrência de uma reflexão plena, que, para coeficiente de reflexão igual a 1, resulta em 2 p.u. de tensão nos terminais do cabo [1].

Desta forma, o valor do comprimento crítico de um cabo pode ser calculado igualando-se o tempo de subida do pulso a dois tempos de viagem do pulso pelo cabo, obtendo-se:

$$ts = 2 \cdot tv$$

$$ts = 2 \cdot \frac{Lc}{v}$$

$$Lc = \frac{ts \cdot v}{2}$$

Onde:

- Lc é o comprimento crítico do cabo;
- ts é o tempo de subida do pulso;
- tv é o tempo de viagem do pulso;
- v é a velocidade de propagação do pulso.

Conforme exposto acima, é possível definir, para coeficientes de reflexão próximos da unidade, as seguintes condições para a ocorrência ou não das sobretensões:

$$tv < \frac{ts}{4} \Rightarrow L_{cabo} < \frac{Lc}{2} \rightarrow \text{não há sobretensão}$$

$$\frac{ts}{4} \leq tv < \frac{ts}{2} \therefore \Rightarrow \frac{Lc}{2} \leq L_{cabo} < Lc \rightarrow \text{sobretensão entre 0 e 1 p.u.}$$

$$tv \geq \frac{ts}{2} \Rightarrow L_{cabo} > Lc \rightarrow \text{sobretensão de 1 p.u.}$$

A partir das equações acima se obtêm as seguintes conclusões:

- Se o comprimento do cabo entre o conversor e o motor é menor que a metade do comprimento crítico, não haverá sobretensão. Tal afirmação se deve ao fato de que, como o tempo de viagem do pulso no cabo é pequeno, a onda refletida (do conversor para o motor), que tem polaridade negativa, chega rapidamente ao motor impedindo que a tensão no mesmo possa crescer.
- Se o comprimento do cabo entre o conversor e o motor é menor que o comprimento crítico, mas superior que a metade do mesmo, haverá uma

sobretensão menor que 1 p.u. Isto acontece porque, como o tempo de viagem do pulso é considerável, a onda refletida, que tem polaridade negativa, demora um certo tempo para chegar ao motor, possibilitando o crescimento da tensão no terminais mesmo. Porém, esta onda refletida chega antes que a tensão no motor alcance a amplitude de 1 p.u.

- Se o comprimento do cabo entre o conversor e o motor é maior que o comprimento crítico, haverá sobretensão de 1 p.u. Como o tempo de viagem do pulso no cabo é grande, a onda refletida (do conversor para o motor), que tem polaridade negativa, demora a chegar ao motor possibilitando o crescimento da tensão ao nível de 1 p.u.

Além do comprimento do cabo, o arranjo geométrico do mesmo influencia no valor da sobretensões. Tem-se que a velocidade dos pulsos em cabos dispostos em arranjo triangular (trifólio) é significativamente superior à velocidade em cabos dispostos em arranjo planar. Isto posto, cabos em trifólio têm seu comprimento crítico maiores que os em arranjo planar, e para um mesmo comprimento de cabo, as sobretensões são menores.

Outro aspecto importante é a distribuição das sobretensões nos enrolamentos do motor. Ao contrário do que ocorre na frequência fundamental, onde a tensão é distribuída igualmente pelos enrolamentos, a tensão dos pulsos PWM distribui-se de maneira não-uniforme nos enrolamentos, sendo que as primeiras espiras ficam sujeitas à maior diferença de potencial. À medida que se caminha para o interior dos enrolamentos, os níveis de tensão se reduzem, progressivamente. Há estudos que relatam que a primeira espira da primeira bobina do enrolamento pode estar sujeita a uma queda de tensão de 85% da tensão de pico [5]; outros estudos, porém, afirmam valores menores, na faixa de 40 a 70% [4].

Apesar de se tratar de um fenômeno de natureza transitória, as sobretensões se repetem a cada vez que um novo pulso de tensão atinge os terminais do motor.

Tal fato ocasiona, ao longo do tempo, ruptura do isolamento do motor, reduzindo drasticamente sua vida útil.

2.2 Correntes de Alta Freqüência em acionamentos PWM

As elevadas taxas de variação de tensão em alta freqüência dão origem a correntes de freqüência igualmente elevadas, as quais circulam entre as fases, e entre estas e a terra. Tal fenômeno ocorre devido ao fato de que, em altas freqüências, as capacitâncias existentes no sistema se tornam um caminho de baixa impedância, possibilitando a circulação de tais correntes.

As correntes que circulam através das capacitâncias entre as fases do sistema são conhecidas como correntes de modo diferencial, enquanto as que circulam através da capacitância entre as fases e a terra são chamadas de correntes de modo comum. É válido dizer que as correntes de modo comum também circulam através da capacitância existente entre o estator do motor de indução e a terra.

A figura 2.2 detalha o circuito percorrido por tais correntes em um sistema de acionamento PWM.

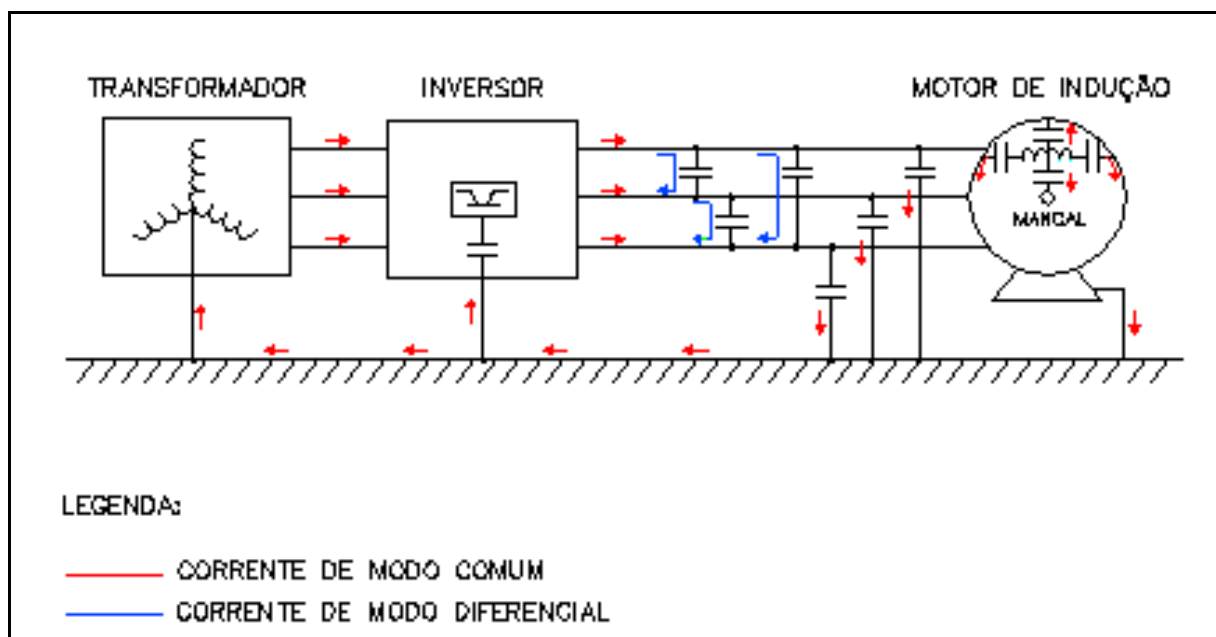


Figura 2.2 – Circulação das correntes de alta freqüência em um sistema de acionamento PWM

A cada transição da tensão de saída do conversor (de zero para V_{cc} ou deste valor para zero), a capacitância distribuída presente entre os cabos das fases será carregada ou descarregada, dando origem a uma corrente transitória de alta frequência (corrente de modo diferencial) que se sobrepõe à corrente de saída do conversor. Em cabos longos, o pico desta corrente pode provocar a atuação da proteção contra sobrecorrente do conversor, gerar um sobreaquecimento e destruição da capacitância de “snubbers” e resultar em medições inadequadas para fins de realimentação [6-7].

A respeito das correntes de modo comum, as mesmas se devem à tensão de modo comum gerada pelo conversor. A operação normal do conversor PWM gera tais tensões, visto que a soma das tensões das três fases em relação à terra é diferente de zero, conforme mostrado na figura 2.3:

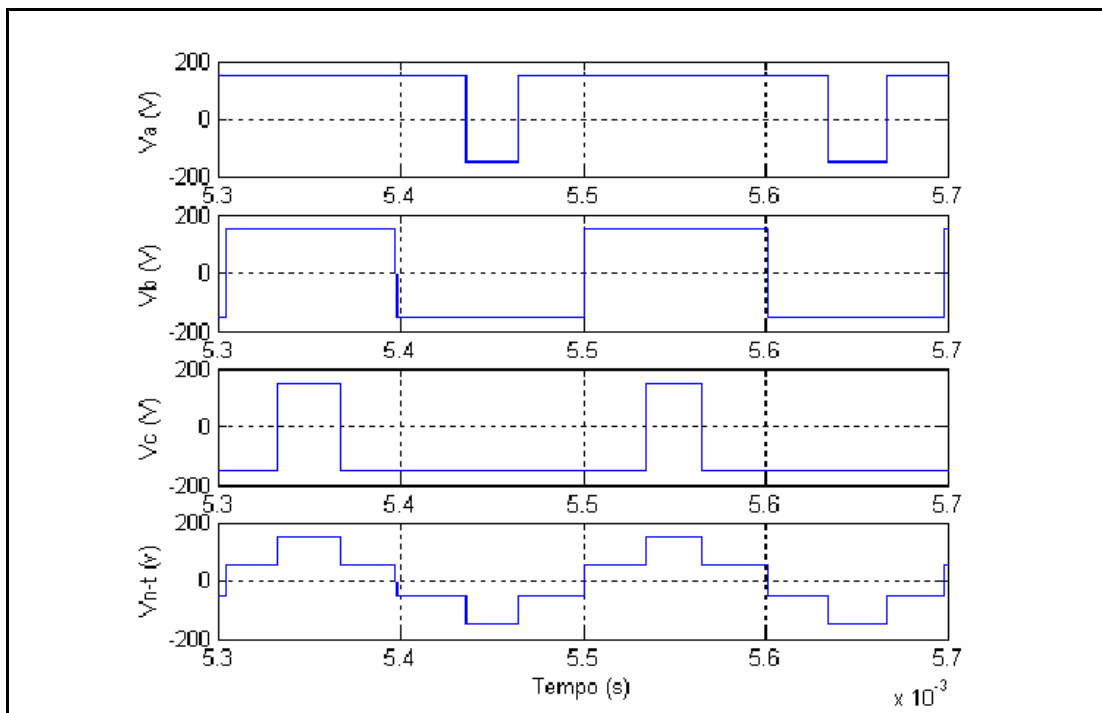


Figura 2.3 – Tensões entre fase e ponto médio do barramento C.C. (V_a , V_b e V_c) geradas pelo conversor PWM e a tensão resultante entre neutro e terra (V_{n-t}), figura extraída de [1]

A figura 2.4, retirada de [8], ilustra as oscilações de tensão nos terminais do motor e as correntes de modo comum, para cabos com 80 metros de comprimento e disposto em arranjo triangular (trifólio).

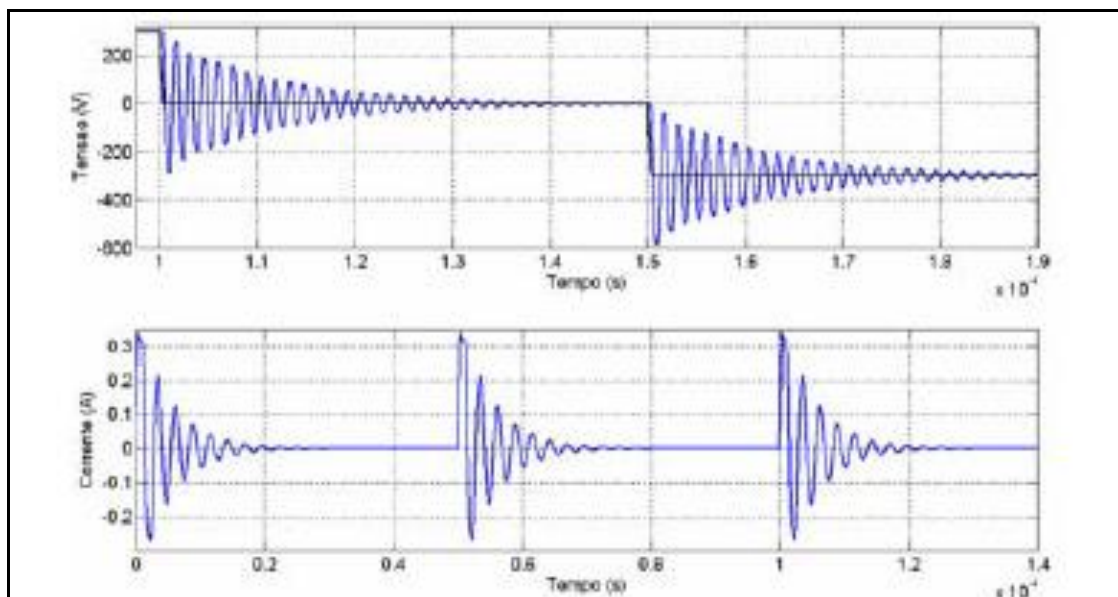


Figura 2.4 – Curva superior: tensões no início (em preto) e no final do cabo (em azul). Curva inferior: corrente de modo comum medida no aterramento da fonte (cabo de 80 metros, arranjo triangular).

Como consequência da circulação destas correntes, pode-se citar os problemas de interferência eletromagnética com sistemas vizinhos ao acionamento e a atuação indevida de relés de proteção de falta a terra. Um outro problema diz respeito a falha nos rolamentos dos motores. A tensão de modo comum induz tensões no eixo da máquina, de forma que o mesmo vai acumulando uma crescente quantidade de carga elétrica. O potencial do rotor aumenta com relação a terra até atingir um nível capaz de romper a rigidez dielétrica da graxa presente nos rolamentos, originando uma corrente de descarga que fluirá para a carcaça aterrada, passando pelos rolamentos. Essas descargas desgastam as esferas e a pista do rolamento, dando origem a pequenos furos, que começam a se sobrepor e, caso haja correntes de descarga por longo tempo, sulcos (crateras) serão formados. A erosão acarreta redução da vida útil dos rolamentos e pode provocar falha da máquina.

Já se encontram difundidas algumas técnicas para sanar os problemas relativos à passagem das correntes de modo comum pelos rolamentos das máquinas.

Entretanto, algumas propostas não são passíveis de serem aplicadas na prática, visto que umas possuem custo elevado e outras são tecnicamente inviáveis. Dentre as alternativas para solução do problema, pode-se citar:

- Instalação de blindagem eletrostática entre estator e rotor: a blindagem do entreferro através da utilização de uma gaiola de Faraday impediria o acoplamento eletrostático entre o estator e o rotor, eliminando a indução de tensão no eixo. Apesar de apresentar uma grande eficácia, esta solução é extremamente difícil de implementar e possui custo elevado. Além disso, não existem motores comercialmente fabricados que utilizem tal recurso.
- Rolamentos com esferas de cerâmica: as esferas de cerâmica interrompem o caminho elétrico entre o eixo e a carcaça da máquina, impedindo a circulação de correntes pelo rolamento. Esta alternativa tem que ser analisada com cuidado, visto que a tensão induzida no eixo da máquina continuará crescendo, podendo gerar uma corrente de descarga para a terra que fluíra através de outro caminho, como por exemplo, pela carga acionada.
- Escova de aterramento: a instalação de uma escova em contato com o eixo do motor e à carcaça do mesmo propicia um caminho de baixa impedância, evitando que a corrente de modo comum circule pelos rolamentos. Como ponto fraco, esta alternativa exige manutenção freqüente para troca das escovas.
- Graxa condutora: esta graxa, por conter partículas condutoras em sua composição, propicia um caminho contínuo para a corrente através do rolamento, drenando as cargas elétricas aos poucos. Tal fato evita o acúmulo de cargas e descargas de elevada intensidade que poderiam danificar o rolamento. Porém, sua utilização é tecnicamente inviável, dado que as partículas condutoras presentes na graxa aumentam o desgaste mecânico no rolamento, causando falhas prematuras.

Analisando as alternativas acima, nota-se que a maioria delas está baseada no conceito de interrupção do caminho de circulação das correntes de modo comum ou no fornecimento de um caminho alternativo para circulação das mesmas. Existem, porém, outros métodos que atuam no sentido de minimizar as tensões de modo comum, e, conseqüentemente, as correntes de modo comum. Tais métodos minimizam não somente as correntes que circulam pelos rolamentos dos motores, mas também diminuem a corrente que flui pelo sistema de aterramento e, como dito anteriormente, geram problemas de interferência eletromagnética. Essas alternativas serão descritas no próximo subitem.

2.3 Métodos para a Minimização das Sobretensões e Correntes de Modo Comum

Atualmente, encontram-se bastante difundidas alternativas para eliminar/minimizar os problemas de alta freqüência já descritos neste trabalho. Tais alternativas baseiam-se basicamente na utilização de filtros ou na modificação da topologia de chaveamento do conversor de freqüência.

A respeito da utilização de filtros, neste trabalho serão brevemente descritos apenas os filtros que podem ser utilizados na saída do conversor de freqüência, visto que filtros instalados nos terminais do motor freqüentemente não podem ser utilizados devido à inacessibilidade dos terminais do mesmo. Dentre os filtros que podem ser utilizados na saída do conversor, pode-se citar:

- Reator: a instalação de um reator na saída do conversor de freqüência tem por objetivo aumentar o tempo de subida do pulso gerado pelo conversor, diminuindo, desta forma, a sobretensão nos terminais do motor. Este reator também diminui o dv/dt da tensão de modo comum, reduzindo a corrente de modo comum que circula pelo sistema e todos os problemas gerados pela circulação da mesma. Esta alternativa é bastante utilizada atualmente, visto que, além das vantagens citadas acima, trata-se de um filtro de baixo custo e instalação simples. Como principais desvantagens pode-se mencionar as

grandes dimensões do reator para motores de potência elevada, a possibilidade de geração de novas oscilações fracamente amortecidas e a diminuição do torque do motor, já que está sendo inserido no circuito um reator em série, aumentando a queda de tensão.

- Filtro RLC (dv/dt): a instalação de filtros RLC ou RC na saída do conversor de frequência também tem como função aumentar o tempo de subida do pulso gerado pelo conversor. Esses filtros reduzem as variações da tensão de modo comum e diferencial, reduzindo-se as sobretensões nos terminais do motor e circulação de correntes de modo comum. Possuem topologia semelhante ao filtro senoidal, porém seus componentes apresentam menores valores e, por isso, menor custo. Como principal desvantagem pode-se mencionar a limitação da frequência de chaveamento do conversor, visto que, em alguns casos, os tempos de subida e descida do pulso são muito longos.
- Filtro passa-baixa (filtro senoidal): esta alternativa tem como função filtrar as componentes harmônicas da tensão gerada pelo conversor (que possuem elevada frequência), permitindo apenas a passagem da componente fundamental. Este filtro elimina completamente o problema das sobretensões nos terminais do motor, visto que o comprimento crítico para a frequência fundamental é da ordem de quilômetros, e reduz também a tensão de modo comum gerada. Apesar de ser o filtro que apresenta melhores resultados, tem como principais desvantagens o alto custo e as grandes dimensões físicas.

É importante salientar que a topologia do filtro a ser implantado e os valores dos componentes do mesmo dependem das características do sistema, como o conversor de frequência utilizado, a potência do motor, o comprimento e características do cabo alimentador, etc. Logo, não existe um filtro padrão que atenda todas as situações, sendo necessário, portanto, a simulação de várias alternativas para determinar qual oferece melhores resultados.

3. DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE MINERAÇÃO/ PELOTIZAÇÃO

Para a elaboração deste trabalho foram selecionados dois motores, um de baixa tensão e o outro de média tensão, sendo que o primeiro opera em uma planta de pelotização e o segundo faz parte de uma planta de mineração.

Neste capítulo será descrito de forma sucinta o processo de mineração e de maneira mais detalhada o processo de pelotização, tendo em vista que apenas o motor que opera na planta de pelotização será simulado neste trabalho.

3.1 Processo de Mineração

O processo de mineração inicia-se com a exploração da jazida, conhecida também como lavra, onde está localizado o minério bruto. Para extração desse minério é necessário o desmonte da rocha, que é realizado através de explosivos colocados em furos profundos abertos por perfuratrizes. Após a detonação, o material é retirado através de grandes escavadeiras e transportado por caminhões fora de estrada para a planta de mineração (usina de beneficiamento), onde o mesmo será processado.

A usina de beneficiamento é necessária para a adequação dos minerais aos processos industriais, visto que os mesmos não se apresentam na natureza na forma em que serão consumidos pela indústria, seja por suas granulometrias (tamanhos) ou por estarem associados a outros minerais.

Basicamente, as operações envolvidas em uma mineração são: cominuição (fragmentação), classificação (separação granulométrica), concentração do minério e desaguamento.

A cominuição, ou redução de tamanho, é uma etapa importante no processamento da maioria dos minerais que visa à produção de partículas com tamanho e formatos pré requeridos, adequando o mineral para os processos

subseqüentes. Os processos de cominuição são basicamente divididos em duas classes distintas: britagem (cominuição inicial) e moagem (cominuição final) [9]. O termo britagem se aplica quando a redução de tamanho envolvida visa à obtenção de produtos com granulometria superior a 10 milímetros [9] e nesta etapa são utilizados os britadores. A moagem é utilizada para obtenção de partículas inferiores a 10 mm e para isso são utilizados os moinhos. É válido dizer que a etapa de cominuição de uma planta de mineração pode conter apenas circuitos de britagem ou britagem associada à moagem. Tal definição depende das características do minério.

A classificação consiste no processo de separação das partículas por tamanho e tem por objetivo verificar se a granulometria produzida na etapa de fragmentação atingiu o tamanho no qual as partículas dos minerais úteis se separam fisicamente das partículas indesejáveis. A classificação de partículas maiores é realizada através da utilização de uma superfície perfurada com dimensões pré-calculadas (peneiras); já a classificação de partículas menores ocorre através da diferença de velocidade de sedimentação das partículas imersas num meio fluido (ar ou água), método utilizado pelos classificadores espirais, hidrociclones e ciclones.

A concentração é a etapa na qual ocorre a aglomeração do minério de ferro na forma mais concentrada possível, o que ocorre através da separação dos minerais que interessam dos que não interessam. A separação de minerais exige que haja uma diferença física ou físico-química entre o mineral de interesse e os demais e duas propriedades físicas são as mais utilizadas na separação ou concentração de minerais: diferença de densidade, utilizado pelos jigues e diferença de susceptibilidade magnética, método utilizado pelos separadores magnéticos. Quando não existe diferença de propriedade física entre os minerais que se que separar, utiliza-se de técnicas que tomam como base propriedades físico-químicas de superfície dos minerais, sendo a flotação a técnica mais utilizada. Tal método se dá em meio aquoso, através da utilização de reagentes específicos, denominados coletores, depressores e modificadores, que permitem a recuperação seletiva dos minerais de interesse por adsorção em bolhas de ar [9]. É importante dizer que geralmente uma planta de mineração possui vários estágios de concentração, que no

fim do processo possibilitam a obtenção do minério desejado. Após este estágio tem-se dois produtos: o minério desejado, denominado concentrado e o rejeito, que é o material inútil.

A água desempenha um papel fundamental no tratamento de minérios, visto que, na maioria das vezes, as operações de concentração são realizadas a úmido. Entretanto, faz-se necessário a retirada da água do concentrado, diminuindo assim a umidade do minério. Essa operação é conhecida como desaguamento e os equipamentos mais utilizados são os espessadores, utilizado na primeira etapa, e os filtros, utilizado na etapa subsequente. Os espessadores consistem de grandes tanques onde a polpa é depositada e, através da sedimentação das partículas sólidas no fundo, há a separação do concentrado da água. Neste caso são conhecidos como espessadores de concentrado. Existem também os espessadores de lama, que são utilizados para separar a água do rejeito, com o intuito de eliminar apenas o rejeito e reaproveitar a água bombeando-a novamente para o processo.

A planta de mineração abordada neste trabalho produz dois produtos distintos com relação à granulometria do minério de ferro, denominados *Pellet Feed* e *Sinter Feed*. O *Pellet Feed* é um minério mais fino, de granulometria inferior a 0,15 mm e, por isso, possui maior valor agregado que o *Sinter Feed*, de granulometria superior a 0,15 mm. É válido dizer que no processo de pelotização, que será descrito no próximo subitem, é utilizado o *Pellet Feed*.

O fluxograma ilustrado na figura 3.1, de maneira simples, as etapas descritas acima.

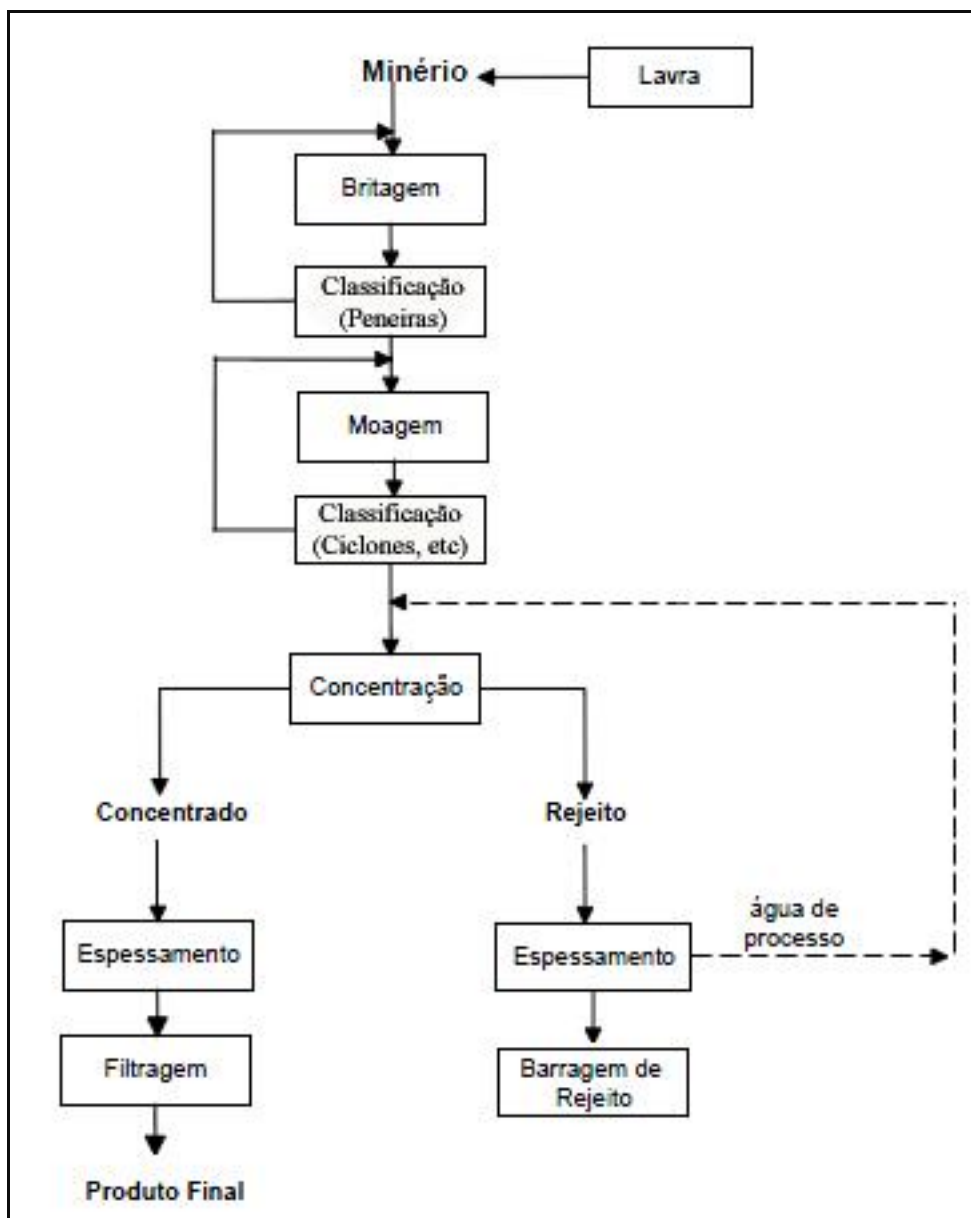


Figura 3.1 – Fluxograma do Processo de Mineração, figura extraída de [10]

3.2 Processo de Pelotização

A usina de pelotização utiliza o minério já beneficiado em uma planta de mineração, através das operações citadas anteriormente. Na planta em análise neste trabalho, o minério diluído em água é bombeado através de um sistema de tubulações, denominado mineroduto, até a usina de pelotamento, onde o mesmo será transformado em pelotas.

A pelotização é um processo de aglomeração que, através de um tratamento térmico, transforma as frações finas de minério em esferas de tamanhos na faixa de 8 a 18 mm, possuindo características apropriadas para alimentação nas usinas siderúrgicas para fabricação de aço.

O fluxograma ilustrado na figura 3.2 mostra, de forma simplificada, as etapas envolvidas no processo de Pelotização desta planta.

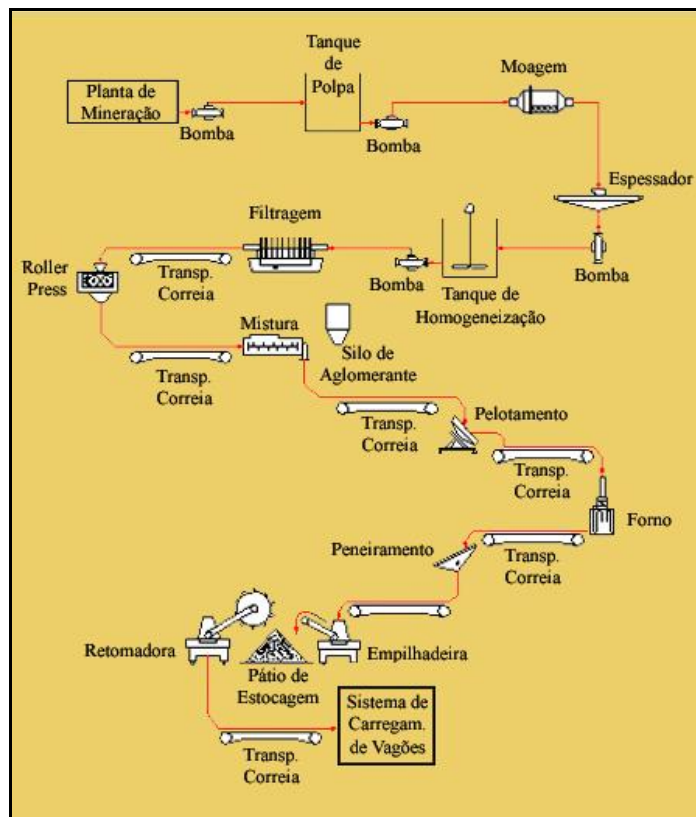


Figura 3.2 – Fluxograma do Processo de Pelotização

Tanque de Polpa: A usina de pelletização recebe, através de um mineroduto, o minério em forma de polpa (minério diluído em água) proveniente de uma usina de beneficiamento (mineração). Essa polpa é armazenada nos tanques de polpa, de onde será bombeada para a Moagem.

Moagem: O processo de formação de pelotas exige que as partículas de minério possuam granulometria fina. Neste contexto, a Moagem tem como objetivo a fragmentação do minério, adequando-o à granulometria necessária. Na planta em foco são utilizados dois moinhos de bolas, que possuem em seu interior esferas (bolas) de aço, e, ao girar, tais esferas caem sobre o minério causando sua fragmentação. Esta etapa possui grande consumo energético, visto que cada moinho é acionado por dois motores de indução com potência de 4500 kW cada, alimentados em 13,8 kV.



Figura 3.3 – Moinho de bolas

Espessamento: Esta fase utiliza um espessador, que consiste de grande tanque de concreto com diâmetro de 35 metros, que recebe a polpa proveniente da Moagem e tem como função elevar o percentual de sólidos da polpa para a próxima etapa. Tal fato ocorre através do processo de sedimentação das partículas, onde o minério, por

ser mais denso, precipita-se para o fundo do espessador, sendo direcionado para os tanques de homogeneização e posteriormente para a Filtragem. A água, por sua vez, volta ao processo sendo bombeada para a etapa anterior (Moagem). É importante dizer que espessadores possuem em seu interior uma espécie de “pá” rotativa, que sempre está girando, evitando, dessa forma, a solidificação do minério no fundo do tanque.

Tanque de Homogeneização: Após o espessamento, a polpa de minério é bombeada para os tanques de homogeneização. Estes tanques possuem um agitador rotativo no seu interior, que mantém os sólidos em suspensão e, tem como função principal, garantir a homogeneização da polpa, minimizando as variações das características físicas e químicas do material. Além disto, tais tanques funcionam como um estoque intermediário de minérios, precavendo-se contra eventuais paralisações em etapas anteriores. A polpa é bombeada para a Filtragem através de bombas de velocidade variável, que variam de rotação em função da quantidade de polpa necessária aos filtros de disco.

Filtragem: Nesta fase, a polpa de minério deve ter sua taxa de água reduzida de aproximadamente 30 % para algo em torno de 10 %, que é a faixa de umidade considerada adequada para as etapas posteriores. Para tal, são utilizados os filtros de discos à vácuo, que possuem discos com tecidos filtrantes onde a polpa é alimentada. Através da ação de bombas de vácuo, ocorre a sucção desta polpa, de modo que, a água passa pelos tecidos filtrantes, enquanto o minério permanece sobre os mesmos, agora com um baixo teor de umidade. O produto da Filtragem é descarregado pelos filtros sobre as correias transportadoras, sendo enviado para o prédio do *Roller Press*, próxima fase do processo.



Figura 3.4 – Filtro de Disco a Vácuo

Roller Press: Nesta etapa o minério é prensado em dois rolos denominados *Roller Press*, sendo um móvel e o outro fixo. O objetivo desta etapa é aumentar a área superficial específica das partículas minerais, melhorando a qualidade das pelotas e a produtividade da pelotização. Após esta etapa, o minério é conduzido através de correias transportadoras até o prédio da Mistura.

Mistura: Ao minério proveniente da etapa anterior são adicionados, neste prédio, aglomerantes e aditivos denominados insumos, tais como calcário, antracito (carvão), aglomerantes orgânicos e bentonita. A função da bentonita e dos aglomerantes orgânicos é a de facilitar a formação de pelotas nos circuitos do Pelotamento, proporcionando melhor distribuição granulométrica e maior rigidez mecânica às pelotas. O calcário é utilizado para corrigir propriedades químicas da pelota, principalmente basicidade; já o antracito, tem por finalidade auxiliar o processo de queima, reduzindo o consumo de óleo combustível utilizado para aquecimento dos gases no processo de queima das pelotas. Após as dosagens pré-estabelecidas para cada um destes insumos, os mesmos são misturados e homogeneizados ao minério no equipamento denominado misturador. Esta mistura gera condições favoráveis para

a formação das pelotas que se dará na próxima etapa, fornecendo as características físicas, químicas e metalúrgicas necessárias ao produto final.

Pelotamento: Uma das etapas mais importantes do processo de Pelotização, tendo influencia direta na qualidade do produto final, esta fase tem como função a formação das pelotas cruas. O minério de ferro, que foi devidamente preparado tendo recebido os aditivos necessários, é alimentado nos discos pelotizadores, equipamentos responsáveis pela formação das pelotas. Ao ser alimentada no disco pelotizador, a mistura proveniente da etapa anterior sofre um rolamento dentro do disco em sentido circular, provocado pela rotação e inclinação do disco. Com este movimento, as partículas sólidas, revestidas por uma película de água, se tocam, formando o aglomerado ou pelotas cruas. Ao saírem dos discos, as pelotas são uniformemente distribuídas sobre as mesas de rolos, onde serão classificadas por tamanho. As pelotas fora da especificação granulométrica são coletadas por correias transportadoras e enviadas para a mistura, onde serão desagregadas e retornarão para os discos de pelotamento. As pelotas de tamanho adequado que foram classificadas pelas mesas de rolos são descarregadas em uma correia e seguem para a alimentação do forno, onde serão submetidas a um tratamento térmico que proporcionará resistência física e mecânica apropriadas.



Figura 3.5 – Discos Pelotizadores

Forno: Etapa final na formação das pelotas, tem início com a fase de secagem, onde a água contida nas pelotas cruas alimentadas no forno é evaporada através de fluxo de gases quentes que atravessam o leito de pelotas. Em seguida, tem-se a etapa de pré-queima, onde as pelotas são expostas a um fluxo descendente de gases, com temperatura da ordem de 900°C. Finalmente as pelotas são expostas a temperaturas da ordem de 1000 a 1300°C, na etapa denominada queima, e para tanto utiliza-se óleo combustível que é injetado na zona de queima por meio dos queimadores. Na seqüência, ocorre a etapa de resfriamento das pelotas até uma temperatura que possibilite seu transporte via transportadores de correia até o Peneiramento. Este resfriamento é obtido através de grandes ventiladores, que proporcionam um fluxo intenso de ar atmosférico à temperatura ambiente. O forno possui também um sistema composto por precipitadores cuja função é reduzir a emissão de particulados para a atmosfera. Ao saírem da zona de resfriamento, as pelotas são descarregadas por gravidade no silo de descarga e deste silo seguem para o peneiramento através de correias transportadoras.

Peneiramento e Pátio de Estocagem: Nesta etapa é realizado o ajuste final na especificação granulométrica das pelotas através das peneiras, onde as pelotas com granulometria inferior ao especificado retornam para a etapa anterior. As pelotas com granulometria adequada são transportadas por correias até um equipamento denominado empilhadeira, responsável por empilhar as pelotas no pátio de estocagem.

Sistema de Embarque de Produtos: A retirada das pelotas do pátio de estocagem é realizada pela recuperadora, equipamento que possui em sua extremidade uma roda com várias caçambas, que, ao passar pelo pátio, retiram o produto (pelotas) e as transferem para um transportador de correia. Esse transportador, por sua vez, conduz as pelotas para o embarque ferroviário, onde os vagões de trens serão preenchidos através de um sistema de carregamento de vagões, finalizando, assim, todo o processo.



Figura 3.6 – Recuperadora

4. DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS

As plantas de mineração e pelotização possuem sistemas elétricos bastante semelhantes no que diz respeito à distribuição de energia. Ambas possuem uma subestação que recebe energia na tensão de 138 KV, chamada de Subestação Principal, a qual rebaixa esta tensão para 13,8 kV e alimenta as subestações de área. O número de subestações de área é definido em função dos centros de carga a serem alimentados, e são alocadas na planta de forma a ficarem mais próximas dos mesmos. Outro critério para a definição do número de subestações de área se refere à operação da planta. Como exemplo, pode-se citar um pátio de estocagem de minérios, onde os equipamentos que depositam o produto no pátio (empilhadeiras) são alimentados pela subestação A e os equipamentos que retiram esse minério (recuperadoras) são alimentados pela subestação B. Com isso, quando se perde a subestação A, o empilhamento e demais processos anteriores param, porém as atividades de recuperação do minério e processos seguintes continuam normalmente.

As subestações de área são alimentadas pela tensão de 13,8 kV, conforme citado acima, e possuem transformadores de potência que rebaixam esta tensão para duas classes distintas: 480 V e 4160 V. Os motores são alimentados por Centro de Controle de Motores que ficam alocados nestas subestações, sendo que os motores alimentados em 480 V são conhecidos como motores de baixa tensão e os alimentados em 4160 V são chamados de motores de média tensão.

Foram selecionados dois sistemas de acionamento, cujas características resultem potencialmente em maior severidade no tocante aos problemas citados no capítulo 2, em função de utilizarem cabos de maior extensão. Conforme já mencionado, neste trabalho foram realizadas simulações apenas para o sistema de baixa tensão (sistema 1).

4.1 Sistema 1 (Simulado): Motor de baixa tensão, potência de 100 cv, cabo 1x3C 120 + 1C 70 mm² de 480 metros

Este motor aciona um agitador de polpa da usina de pelotização, que está instalado em um tanque de empolpamento de minério, cuja função é adensar a polpa de minério aumentando a porcentagem de sólidos. Este equipamento tem como função agitar a polpa que está no tanque, impedindo que a mesma sedimente no fundo do mesmo e se solidifique.

Conforme descrito acima, nota-se que tal agitador não pode parar quando da falta de energia elétrica, visto que, caso isso aconteça, poderá haver a solidificação da polpa no fundo do tanque, o que acarretará na necessidade de esvaziamento desse tanque e parada do processo. Isto posto, este motor é alimentado por um Centro de Controle de Motores que possui uma interligação com o gerador de emergência do tipo moto-gerador a diesel. Em regime de funcionamento normal, o gerador está desligado e o motor é alimentado pela concessionária, como as demais cargas; todavia quando da falta de energia, o gerador entra em funcionamento e alimenta as chamadas cargas de emergência. Tal operação é realizada pelo painel de proteção e comutação automática do grupo gerador.

Devido o processo no qual este agitador trabalha, não há necessidade de controle de velocidade do mesmo. Neste caso, o conversor de frequência está sendo utilizado para diminuir os impactos da partida deste motor sobre o gerador. Foi realizado um estudo e constatou-se que, caso não fosse utilizado tal conversor, seria necessário grupo geradores com potência maior, acarretando aumento de custo.

O sistema elétrico que supre este motor é composto por um transformador de força, potência 2 MVA, que rebaixa a tensão de 13,8 kV para 480 V e alimenta o Centro de Controle de Motores CCM-01 nesta tensão. O CCM-01 alimenta o painel de comutação automática do grupo gerador, que alimenta o Centro de Controle de Motores CCM-02, e este, por sua vez supre o conversor de frequência. O diagrama unifilar da figura 4.1 mostra, de maneira simplificada, o sistema elétrico em questão.

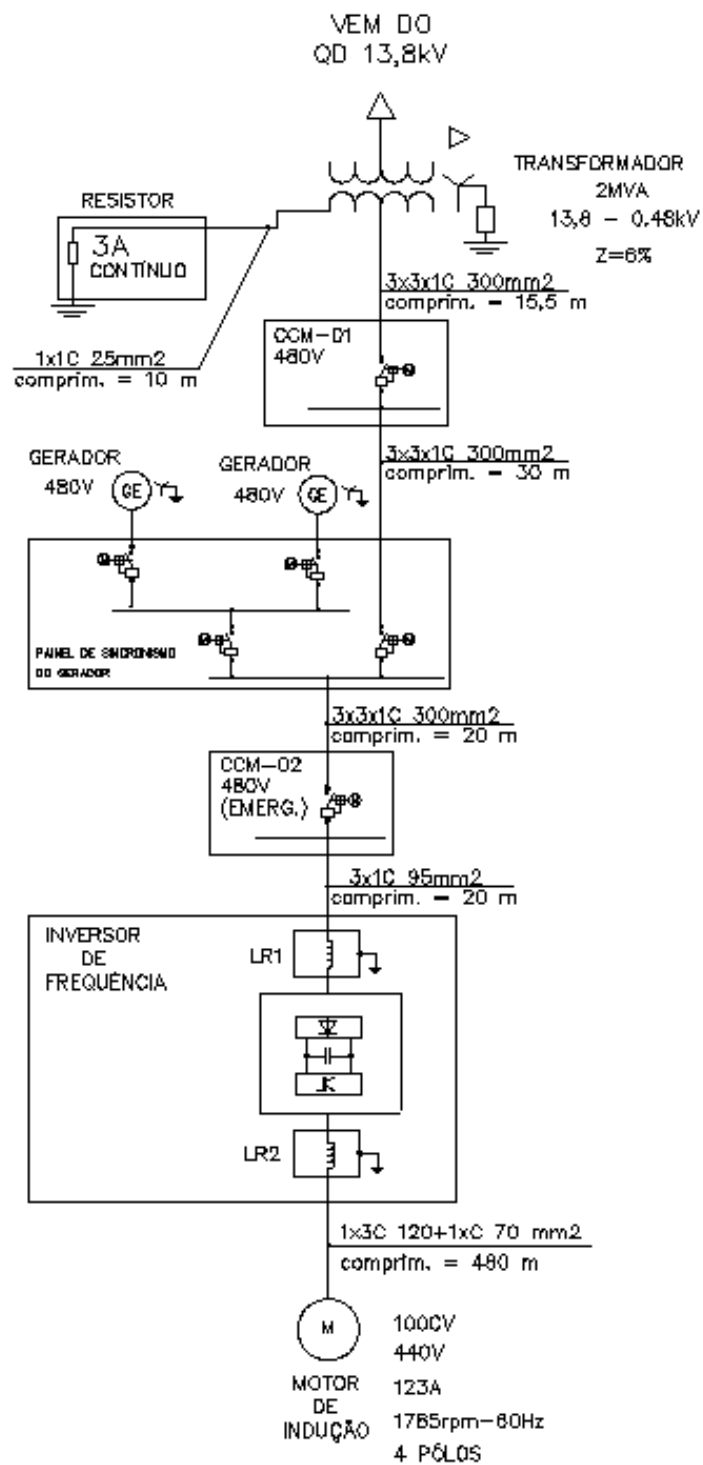


Figura 4.1 – Diagrama Unifilar do Sistema 1

O transformador de potência deste sistema, do fabricante WEG, possui uma potência de 2MVA, relação de transformação 13,8 kV – 480 V, impedância percentual de 6% e seu neutro é aterrado através de um resistor de aterramento de alto valor ôhmico.

Este resistor de aterramento tem como função limitar a corrente de falta fase-terra em 3 A continuamente, ou seja, tal falta não desliga o motor. Neste sistema, a proteção só será atuada no caso de uma segunda falta fase-terra, visto que neste caso o curto circuito passará a ser fase-fase. O resistor de aterramento, do fabricante Asseplan, possui um módulo de supervisão, que indica na sala de controle a existência de uma falta fase-terra, e um módulo de limitação, composto por 6 resistores em série de 15,4 ohms cada, cuja função é limitar a falta.

O conversor de frequência, do fabricante WEG, possui um retificador do tipo seis pulsos, encontra-se instalado dentro de um painel próprio para ele, do tipo auto suportado e possui dois filtros: LR1 e LR2. O filtro LR1, que está instalado na entrada do conversor, tem como função diminuir o nível de harmônicos gerado pelo conversor que circulam pela rede de alimentação (retornam para o sistema) e é composto por um indutor de 190 micro H. O filtro LR2, instalado na saída do conversor, também é composto de um indutor de 190 micro H, e, tem como função, suavizar o pulso de tensão gerado pelo conversor, aumentando o seu tempo de subida e, conseqüentemente, o comprimento crítico do cabo. Além disto, ele diminui o dv/dt da tensão de modo comum, reduzindo desta maneira a amplitude das correntes de modo comum.

Para alimentação do motor, foi utilizado cabo da linha Eprotenax Gsette, do fabricante Prysmian. Estes cabos possuem o quarto condutor concêntrico à reunião das veias das fases e sobre o mesmo é aplicada uma blindagem de fita de cobre, com o propósito de reduzir a interferência eletrostática. Este quarto condutor concêntrico é aterrado nas duas extremidades, sendo uma delas interligada à barra de terra do painel do conversor de frequência e a outra conectada ao terminal de aterramento da caixa do motor. No presente caso, foi utilizado o cabo 1x3C 120 +1C 70 mm² cuja

seção dos cabos fase é de 120 mm² e a do condutor concêntrico é 70 mm². Este cabo possui comprimento aproximado de 480 metros e foi instalado em leito para cabos (bandejas metálicas). A figura 4.2 ilustra a configuração deste cabo.

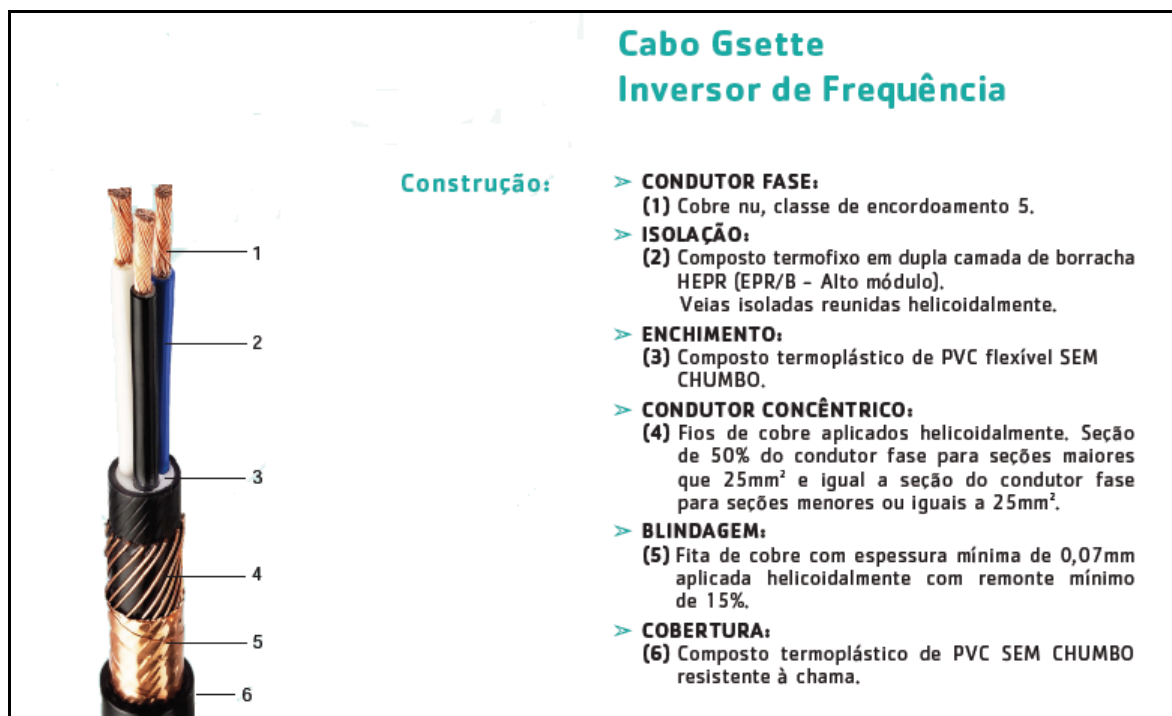


Figura 4.2 – Configuração do cabo Eprotenax Gsette da Prysmian, utilizado para alimentação de conversores de frequência 480V [www.prysmian.com.br]

Finalizando o sistema, tem-se o motor de indução, que no caso é auto-ventilado, possui uma potência de 100 CV, tensão nominal de 440 V e é do Fabricante WEG. É importante observar que neste caso não foi necessária a utilização de ventilador independente para refrigeração deste motor, visto que o mesmo opera com velocidade próxima da nominal. Caso a velocidade do motor fosse baixa, algo em torno de 50% da velocidade nominal, seria necessário a utilização de ventilador independente do motor para resfriamento do mesmo.

Para o aterramento da planta de pelotização, foi utilizada uma malha de aterramento em cada edificação, formada por cabos de cobre nu de seção 50 mm² e hastes de aterramento de comprimento 3 metros e diâmetro de 3/4". A malha de

aterramento de uma edificação é interligada à malha do outro prédio, e assim sucessivamente, de modo que forma-se uma malha geral de aterramento que mantém todos os prédios sob o mesmo potencial e minimiza a resistência de aterramento total da planta. A esta malha de aterramento são conectados todos os equipamentos, como painéis elétricos, transformadores, conversores de frequência, e componentes metálicos como corrimãos, colunas dos prédios, escadas, tanques, etc. Para facilitar o entendimento, a figura 4.3 mostra todo o aterramento envolvido no sistema a ser simulado, desde o transformador até o motor. Os cabos de cor azul são cabos de cobre nu e aqueles de cor vermelha são cabos isolados, da classe de tensão 0,6/1kV.

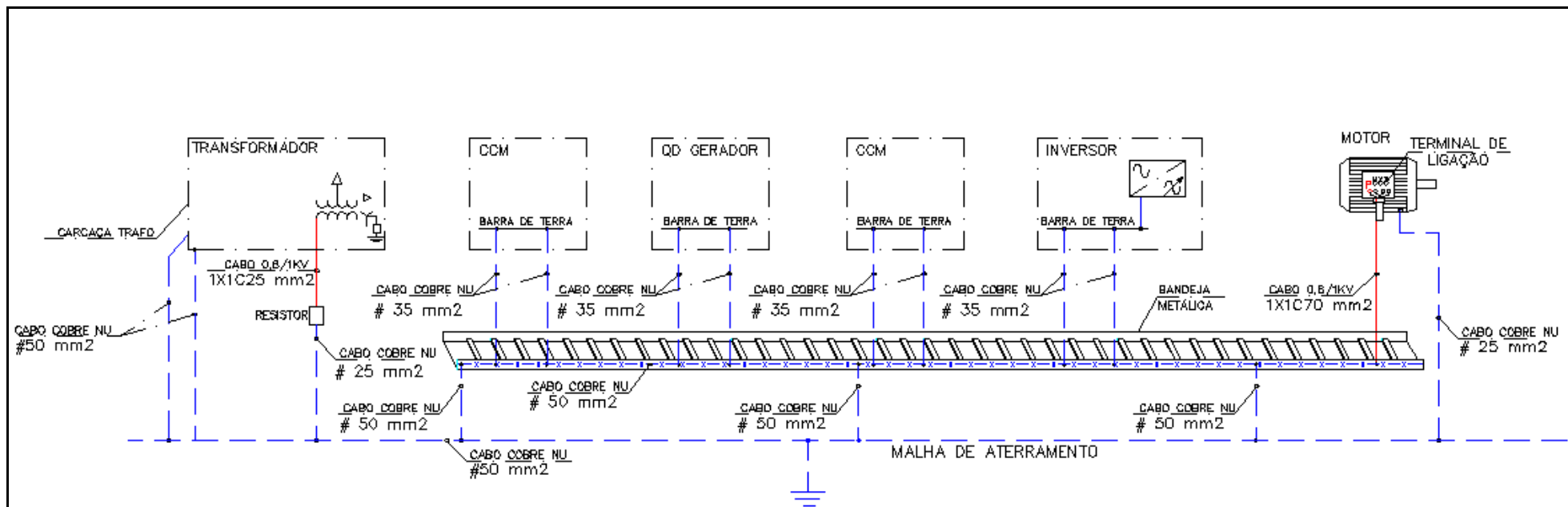


Figura 4.3 – Esquema de aterramento do Sistema 1

Conforme mostrado acima, o neutro do transformador é aterrado através de um resistor de alto valor ôhmico, que limita a corrente de falta em 3 A em regime contínuo. O cabo que interliga o neutro do trafo ao resistor é um cabo isolado, de formação 1x1C25 mm², ao passo que o cabo que interliga o resistor à malha de aterramento é um cabo de cobre nu, seção de 25 mm².

Seguindo o diagrama da figura 4.3, tem-se que a barra de terra do CM-01 é aterrada em dois pontos, através de cabos de cobre nu com seção de 35 mm². Estes cabos interligam a barra de terra do painel ao leito para cabos (bandeja metálica), que, por sua vez, é conectado a hastes de aterramento enterradas no solo através de cabos de cobre nu com seção de 50 mm². O quadro do gerador, o CCM-02 e o conversor de freqüência são aterrados de maneira similar ao CCM-01.

Para o aterramento dos leitos para cabos que conduzem os cabos, é fixado um cabo de cobre nu com seção de 50 mm² na lateral dos mesmos. Os leitos internos às subestações têm suas extremidades aterradas através de uma derivação para o solo. Esta derivação consiste de um cabo com seção de 50 mm², onde uma extremidade é fixada ao cabo que está fixado no leito e a outra extremidade é conectada à malha geral de aterramento. As bandejas metálicas que percorrem grandes trechos, como as que interligam o conversor ao motor, são aterradas a cada 50 metros, através das derivações já explicadas.

Por fim, no tocante ao aterramento do motor de indução, tem-se que motores de baixa tensão têm um ponto de sua carcaça interligada à malha de aterramento através de um cabo de cobre nu com seção de 25 mm². Além disso, o condutor concêntrico do cabo de alimentação tem a função de condutor de proteção, sendo conectado ao terminal de aterramento da caixa de ligação do motor (condutor vermelho).

Os detalhes de todos os equipamentos envolvidos neste sistema são mostrados na tabela 4.1, apresentada a seguir.

Tabela 4.1: Resumo dos dados dos equipamentos do sistema 1

Dados do Motor	
Equipamento Acionado:	Agitador de Polpa
Fabricante:	WEG
Potência:	100 CV
Corrente Nominal:	123 A
Tensão Nominal:	440 V
Nº de Pólos:	4
Tipo:	Alto Rendimento
Carcaça:	250S/M
Dados do Conversor	
Fabricante:	WEG
Modelo:	CFW090142T3848POV1TJZ
Corrente nominal de entrada:	142 A
Tensão nominal:	480 V
Número de pulsos do retificador:	6
Filtro na entrada (para diminuição do conteúdo harmônico gerado pelo conversor que retorna para o sistema):	Reator trifásico, indutância nominal de 190 μ H, corrente nominal de 142A, tensão nominal 440 V, fabricante FQ
Filtro na saída (para redução dos fenômenos de alta frequência):	Reator trifásico, indutância nominal de 190 μ H, corrente nominal de 142A, tensão nominal 440 V, fabricante Waltec
Dados do Transformador	
Fabricante:	WEG
Potência:	2 MVA
Relação de Transformação:	13,8 – 0,48kV
Impedância:	6%
Ligação enrolamento primário:	Triângulo (Delta)

Ligação enrolamento Secundário:	Estrela
Aterramento do neutro	Aterrado através de resistor de alto valor ôhmico
Dados do Resistor de Aterramento	
Fabricante:	Asseplan
Limitação de corrente (corrente nominal):	3A
Tensão nominal:	277 V(480/√3)
Regime:	Contínuo
Composição:	Composto por 6 resistores vitrificados, com resistência de 15,4 ohms cada, associados em série
Dados do Cabo de Alimentação do Motor	
Fabricante:	Prysmian
Modelo	Eprotenax Gsette
Comprimento:	480 metros
Formação:	1x3C 120 +1 C70 mm ² (120 mm ² é a seção das fases e 70 mm ² é a seção do condutor concêntrico)
Classe de Temperatura:	90°C
Disposição:	Trifólio
Método de Instalação:	Leito para cabos (bandejas metálicas perfuradas)
Observação:	O condutor concêntrico exerce a função de condutor de proteção, sendo interligado ao terminal de aterramento da caixa de ligação do motor

4.2 Sistema 2 (Não simulado): Motor de Média Tensão, potência de 2000 cv, cabo 3x1C 120 mm² de 550 metros

Este motor aciona uma bomba de polpa da usina de mineração, que está instalada na saída do espessador de lamas. Ela recebe o rejeito proveniente do espessador e o bombeia para a barragem de rejeitos.

Neste caso, é necessário a utilização de conversor de frequência, já que a bomba necessita ter velocidade variável devido a variação de densidade do material. Um densímetro mede a densidade do rejeito e informa ao sistema supervisor da planta, que efetua o controle da velocidade da bomba.

O sistema elétrico que supre este motor é composto por um transformador de força, potência 12,5 MVA, que rebaixa a tensão de 13,8 kV para 4,16 kV e alimenta o Centro de Controle de Motores CCM-01 nesta tensão. O CCM-01 alimenta o painel do conversor de frequência, que por sua vez supre o motor. O diagrama unifilar da figura 4.4 mostra, de maneira simplificada, o sistema elétrico em questão.

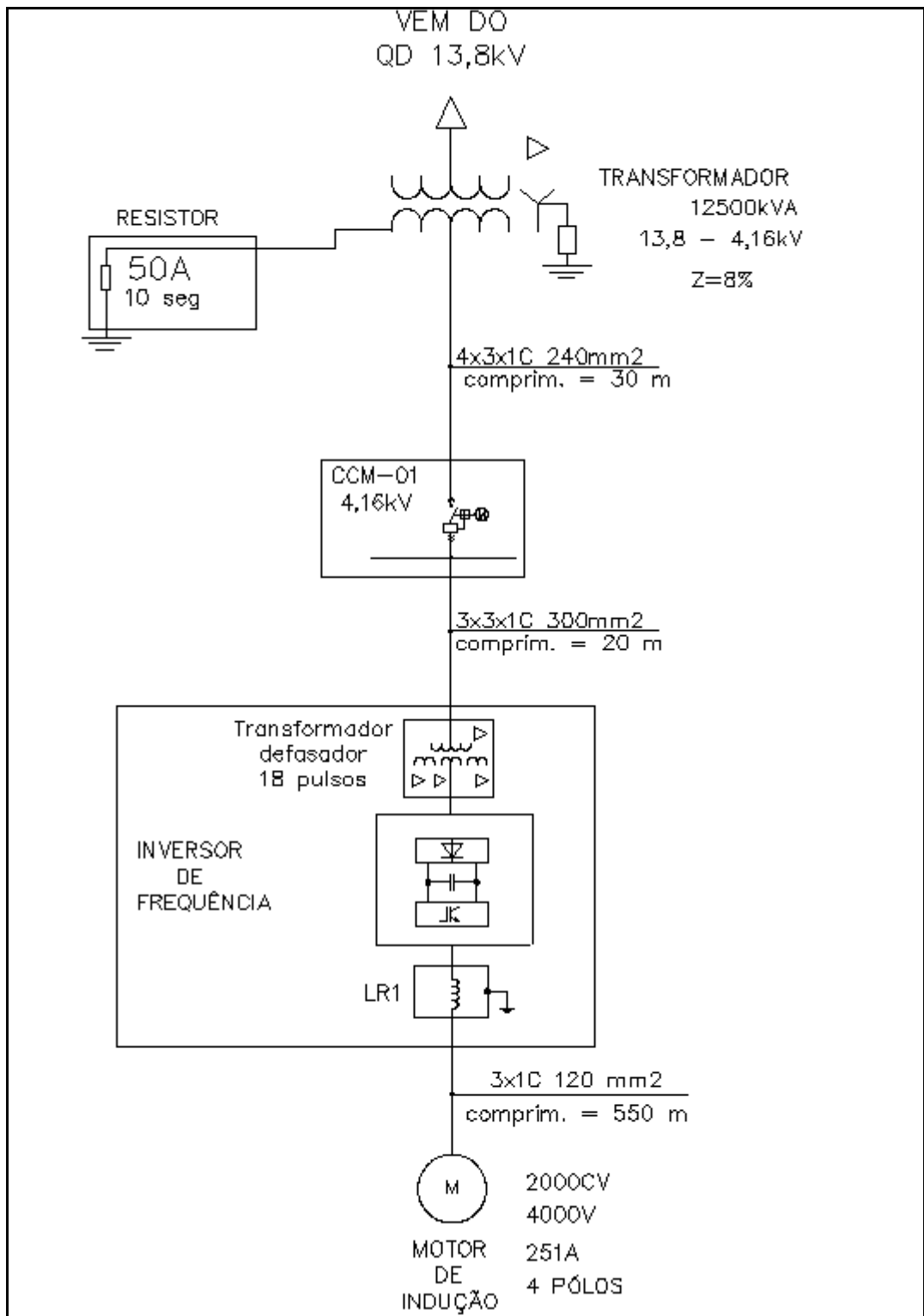


Figura 4.4 – Diagrama unifilar do Sistema 2

O transformador de potência deste sistema, do fabricante Trafo, possui uma potência de 12,5MVA, relação de transformação 13,8 kV – 4,16 kV, impedância percentual de 8% e seu neutro é aterrado através de um resistor de aterramento de baixo valor ôhmico.

Este resistor de aterramento tem como função limitar a corrente de falta fase-terra em 50 A durante um período de 10 segundos e, se a falta persistir após este período, a proteção atua e desliga o sistema. No presente caso foi utilizado um resistor do fabricante Asseplan, composto por um elemento resistivo de 48 ohms.

O Conversor de frequência, do fabricante WEG, possui um retificador do tipo dezoito pulsos e encontra-se instalado dentro de um painel próprio para ele, do tipo auto suportado. Interno a este painel tem-se também um transformador defasador e um filtro na saída do conversor. O transformador defasador possui três enrolamentos secundários ligados em delta com defasamento de -20° , 0 e 20° e tem como função diminuir o nível de harmônicos gerado pelo conversor que circulam pela rede de alimentação. Foi utilizado filtro dv/dt, cuja função é minimizar os fenômenos de alta frequência.

Para alimentação do motor, foram utilizados três cabos singelos com seção de 120 mm^2 cada, classe de tensão 3,6/ 6 kV. É importante dizer que cabos desta classe de tensão não possuem o quarto condutor concêntrico às fases e sua blindagem é aterrada apenas no lado da fonte, que no caso é a barra de terra do painel do conversor. Os cabos em questão possuem comprimento aproximado de 550 metros, estão dispostos em trifólio (arranjo triangular) e instalados em leito para cabos.

Por fim, tem-se o motor de indução, que possui uma potência de 2000 CV, tensão nominal de 4000 V e é do fabricante GE Motors. Tal motor não opera em baixas rotações e por isso não foi necessária ventilação independente para resfriamento do mesmo.

A filosofia de aterramento da planta de mineração é similar à da pelletização, onde a malha de aterramento de cada edifício é interligada entre si, formando uma malha de terra geral e a esta malha são interligados os equipamentos e componentes metálicos. Porém, devido ao critério de projeto adotado, nesta planta foram utilizados cabos com seção de 70 mm² para a confecção da malha. O diagrama abaixo mostra em detalhes todo o aterramento envolvido no sistema, desde o transformador até o motor.

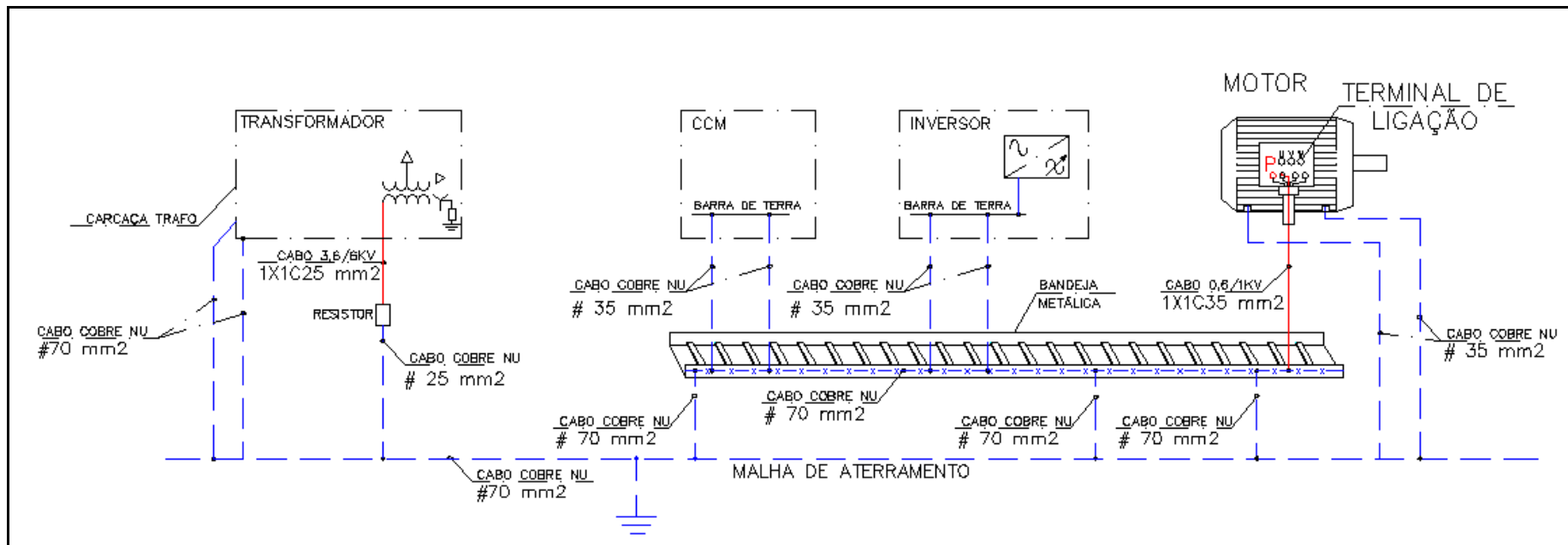


Figura 4.5 –Esquema de aterramento do Sistema 2

Conforme mostra a figura 4.5, e já foi mencionado anteriormente, o neutro do transformador é aterrado através de um resistor de baixo valor ôhmico, que limita a corrente de falta para a terra em 50A, durante o tempo de 10 segundos. O cabo que interliga o neutro do trafo ao resistor é um cabo isolado, classe de tensão 3,6/6kV, formação 1x1C25 mm²; já o cabo que interliga o resistor à malha é um cabo de cobre nu, com seção de 25 mm².

Seguindo o diagrama, tem-se que a barra de terra do CCM-01 é aterrada em dois pontos, através de cabos de cobre nu com seção de 35 mm². A exemplo do sistema anterior, estes cabos interligam a barra de terra do painel ao leito para cabos, que, por sua vez, é conectado a hastes de aterramento enterradas no solo através de cabos de cobre nu com seção de 70 mm².

Para o aterramento dos leitos que conduzem os cabos, é fixado um cabo de cobre nu com seção de 70 mm² na lateral dos mesmos. Os leitos internos às subestações têm suas extremidades aterradas através de uma derivação para o solo. Esta derivação consiste de um cabo com seção de 70 mm², onde uma extremidade é fixada ao cabo que está fixado no leito e a outra extremidade é conectada à malha geral de aterramento. As bandejas metálicas que percorrem grandes trechos, como as que interligam o conversor ao motor, são aterradas a cada 50 metros, através das derivações já explicadas.

Finalmente, tem-se o aterramento do motor de indução, ressaltando-se que motores de média tensão, por questões de segurança, têm sua carcaça aterrada em 2 pontos, através de cabos de cobre nu com seção de 35 mm². O condutor de proteção, marcado em vermelho no diagrama, consiste de um cabo isolado de seção 1x1C35 mm², 0,6/1kV, interligando a caixa de ligação do motor ao cabo de aterramento que está fixado no leito para cabos.

Os detalhes de todos os equipamentos envolvidos neste sistema são mostrados na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Resumo dos dados dos equipamentos do sistema 2

Dados do Motor	
Equipamento Acionado:	Bomba de Polpa
Fabricante:	GE Motors
Potência:	2000 CV
Corrente Nominal:	251 A
Tensão Nominal:	4000 V
Nº de Pólos:	4
Tipo:	PKAF
Carcaça:	450F150
Dados do Conversor	
Fabricante:	WEG
Modelo:	MVW010250T4160PEH30Z
Corrente nominal de entrada:	250 A
Tensão nominal:	4160 V
Número de pulsos do retificador:	18
Transformador defasador	<ul style="list-style-type: none"> - Potência: 1900kVA - Enrolamento primário: ligação em triângulo, tensão nominal 4,16kV - Enrolamentos Secundários: todos os 3 ligados em triângulo, tensão nominal de 1,46kV cada, sendo um com defasamento de 20°C, o outro com 0° C e o último com -20°C
Filtro na saída (para redução dos fenômenos de alta frequência):	Filtro DV/ DT do fabricante FQ (na documentação consultada não há maiores detalhes sobre os componentes do filtro)
Dados do Transformador	
Fabricante:	TRAFO
Potência:	12,5 MVA

Relação de Transformação:	13,8 – 4,16kV
Impedância:	8%
Ligação enrolamento primário:	Triângulo (Delta)
Ligação enrolamento Secundário:	Estrela
Aterramento do neutro	Aterrado através de resistor de baixo valor ôhmico – 50A – 10 segundos
Dados do Resistor de Aterramento	
Fabricante:	Asseplan
Limitação de corrente:	50 A
Tempo máximo de carga	10 segundos
Tensão nominal:	2400 V ($4160/\sqrt{3}$)
Composição:	Composto por 1 elemento resistivo de aço inox com resistência de 48 ohms
Dados do Cabo de Alimentação do Motor	
Fabricante:	Prysmian
Isolação:	EPR
Comprimento:	550 metros
Formação:	3x1C 120 mm ² (3 condutores singelos com seção de 120 mm ² cada)
Classe de Temperatura:	90°C
Disposição:	Trifólio
Método de Instalação:	Leito para cabos (bandejas metálicas perfuradas)

5. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA 1

Conforme já mencionado, os fenômenos de alta frequência presentes em sistemas de acionamento de motores de indução com conversores de frequência do tipo PWM são devidos às elevadas taxas de variação da tensão imposta ao cabo que interliga o conversor ao motor. Neste contexto, a cada dv/dt dos pulsos de tensão que viajam pelos cabos que interligam a saída do inversor aos terminais do motor, ocorre o carregamento ou o descarregamento das capacitâncias distribuídas dos referidos cabos, de forma que, sobreposta a corrente na saída do inversor, há uma corrente transitória cuja frequência é igualmente elevada em relação àquela associada ao tempo de transição dos pulsos de tensão – corrente transitória de modo diferencial. Como já foi explicado anteriormente, em sistemas compostos por cabos mais longos que interligam o inversor PWM ao motor, como é o caso do presente estudo, os picos da corrente transitória podem ser elevados o suficiente para causar a atuação da proteção de sobrecorrente do inversor ou ainda, causar danos aos componentes sensíveis ao sobreaquecimento.

Além dos problemas relacionados à circulação da corrente transitória entre as fases, existem outros devidos à circulação de uma corrente transitória entre os componentes do sistema de acionamento e a terra. Analogamente ao caso contemplado no parágrafo precedente, quando da variação da tensão de modo comum, que também está associada a elevadas frequências, as capacitâncias de acoplamento entre o cabo, o motor, a ponte inversora e a terra são carregadas ou descarregadas, gerando assim uma corrente transitória de alta frequência entre os componentes do sistema citados acima e a terra – corrente de modo comum. Tais correntes podem causar, dentre outros problemas, a interferência eletromagnética conduzida em ambientes industriais, comprometendo o adequado funcionamento de equipamentos eletrônicos próximos ao sistema de acionamento em questão.

Neste contexto, a análise computacional dos fenômenos supracitados requer a representação adequada dos componentes do sistema elétrico de acionamento, contemplando modelos apropriados a estudos de transitórios e de fenômenos de alta frequência. Logo, o transformador, os cabos de interligação, o conversor de frequência e o motor devem então receber atenção especial no que diz respeito à sua representação,

para que os fenômenos em estudo possam ser devidamente reproduzidos computacionalmente.

Dessa forma, os itens subseqüentes descrevem, de forma sucinta, as modelagens empregadas para cada um dos componentes do sistema de acionamento em estudo. Por fim, o sistema completo é modelado e as conclusões a respeito dos fenômenos de alta freqüência presentes são listadas a luz dos resultados apresentados nas simulações e das referências citadas ao longo deste documento.

5.1 Modelagem do cabo de interligação entre conversor e motor

A variação de tensão associada a cada pulso da tensão PWM, seja partindo de zero para V_{dc} ou o oposto, implica num transitório de tensão imposto ao cabo, que se propaga até a sua extremidade e gera uma onda refletida nos terminais do motor que, por sua vez, viaja de volta à ponte inversora. Tal fenômeno de propagação e reflexão ocorre sucessivamente, até que tais ondas viajantes sejam completamente amortecidas pela resistência do cabo. Vale destacar que o fenômeno transitório supracitado ocorre permanentemente durante a operação do sistema, visto que o inversor impõe ao cabo milhares de surtos de tensão dessa natureza em cada segundo.

Em face ao exposto, é mandatório que a modelagem utilizada para o cabo seja capaz de reproduzir a natureza distribuída dos seus parâmetros, para que o fenômeno da propagação de ondas seja simulado. Além disso, considerando que um pulso envolve uma larga faixa de freqüências, tem-se que tal modelo deve ser capaz também de contemplar a variação dos seus parâmetros com a freqüência, causada pelos efeitos pelicular e proximidade. Por fim, considerando que os fenômenos de alta freqüência em análise operam tanto no modo comum como no modo diferencial, a modelagem empregada deve também ser capaz de representar esses dois modos de propagação.

De forma a cumprir com tais requisitos, foi então utilizado um circuito RL denominado "N-Ramos", juntamente a um método especialmente desenvolvido para este fim [1,11], o qual requer, como dados de entrada, as matrizes de impedância do cabo em diferentes freqüências; somente de posse de tal informação é que os parâmetros do

modelo podem ser determinados. Para tanto, utilizou-se a rotina "Cable Constants", do simulador ATP, algumas considerações e ajustes tiveram que ser aplicados, em virtude das limitações deste software.

Resumidamente, as principais questões que tiveram de ser endereçadas foram as seguintes:

1 - O cabo empregado no sistema simulado apresenta, além dos condutores propriamente ditos, mais dois elementos metálicos: um quarto condutor concêntrico, helicoidal, e, sobreposto a esse, uma blindagem em forma de fita, conforme mostrado na figura 4.2. Tendo-se em mãos as informações do fabricante (área total do condutor concêntrico e espessura da blindagem), combinou-se esses dois elementos num único elemento metálico, com espessura e raio equivalentes aos dois em separado.

2 - O equacionamento empregado pelo ATP não considera o efeito proximidade, o qual, em cabos industriais, e também pela natureza dos fenômenos em estudo, é muito significativo [12]. Devido a tal simplificação, espera-se que o amortecimento das oscilações transitórias das tensões e correntes em estudo seja menor do que aquele apresentado na prática, tornando os resultados dessa monografia mais conservadores. Além disso, a velocidade de propagação do cabo deverá destoar da real, o que implica em erros na frequência das oscilações obtida nas simulações, embora este fato não prejudique a análise a ser conduzida neste trabalho.

De posse das matrizes de impedância e capacitância do cabo, obtidas considerando-se o que foi descrito acima, calculou-se então os parâmetros de seqüência positiva e zero do sistema de cabos, em diferentes frequências, determinando-se, finalmente, a sua modelagem completa, tal como descrito em [1, 11]. Tal modelagem é feita através de células "pi" especialmente desenvolvidas para este fim, onde seus parâmetros "série" são agora substituídos por estruturas variáveis com a frequência (circuitos "N-Ramos"), cujo equacionamento encontra-se nas referências citadas. Cabe salientar que a estrutura série do circuito "N-Ramos" é composta por elementos resistivos e indutivos invariáveis com a frequência, mas, cuja conexão conveniente dos mesmos,

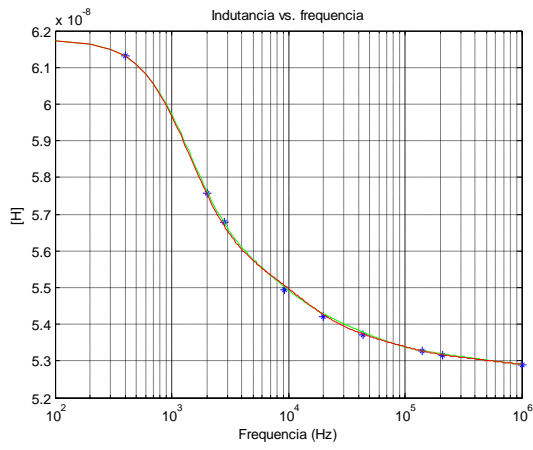
formando os ramos, reproduz adequadamente o efeito da variação destes parâmetros com a frequência, incluindo assim, o efeito pelicular.

A quantidade de ramos presente em cada célula "pi" depende dos valores das resistências e indutâncias medidos em várias frequências, da boa aproximação entre os valores de resistência e de indutância medidos nas várias frequências e os respectivos valores fornecidos pela modelagem "N-ramos" e do esforço computacional envolvido. Visando atingir os requisitos supracitados sem que o esforço computacional seja muito elevado, foram utilizados apenas 5 ramos para representar a impedância do cabo coaxial que interliga o conversor ao motor e outros 5 para representar a impedância da terra.

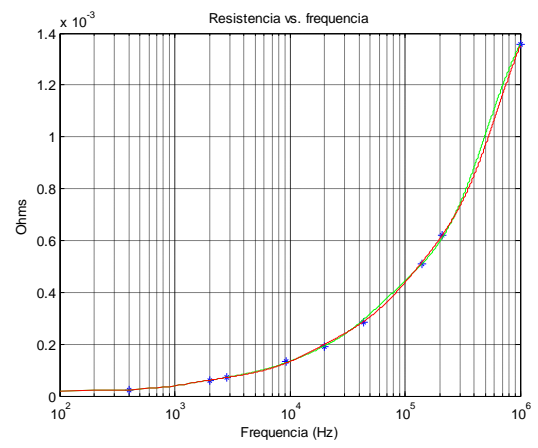
A fim de justificar a escolha da quantidade de ramos supracitada em cada célula "pi", foi realizado um script no MATLAB®, conforme detalhado em [1], cujos dados de entrada são os valores de seqüência positiva e valores mútuos de resistências e indutâncias (obtidos através da rotina "cable constants – ATP" para frequências variando entre 400 Hz a 1MHz); os valores das frequências segundo os quais os parâmetros citados acima foram obtidos e a quantidade de ramos desejada. Os dados de saída fornecidos pelo programa são os valores das resistências e indutâncias que irão compor as estruturas séries de cada célula "pi" variável com frequência.

As figuras 5.1, 5.2 e 5.3 mostram a variação dos parâmetros de seqüência positiva com a frequência segundo o modelo "N-ramos" constituído por 5 e por 6 ramos, assim como os respectivos erros entre os valores considerados exatos e aqueles gerados pela referida modelagem. Embora a modelagem com 6 ramos apresentou menor erro com relação àquela em que se utiliza 5, o esforço computacional é significativamente maior. Tal fato é devido a maior quantidade de nós que é introduzida no circuito "N-ramos" quando se utiliza uma maior quantidade de ramos em cada célula "pi".

Dessa forma, a modelagem com 5 ramos atende de forma satisfatória a representação do cabo, pois apresenta baixo erro na variação dos parâmetros com a frequência, menor esforço computacional e não compromete as análises dos transitórios de tensão e de corrente do acionamento em estudo que serão conduzidas mais a frente.

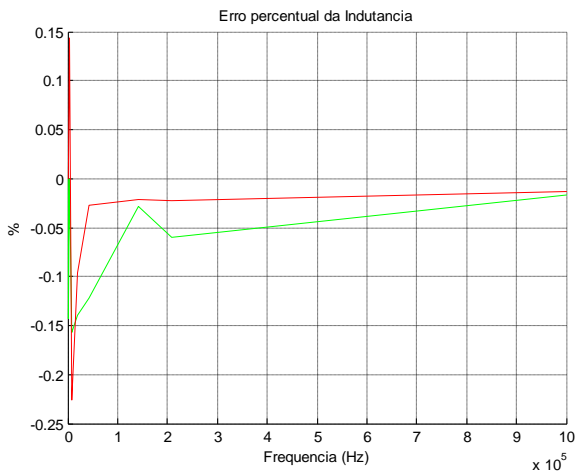


(a)

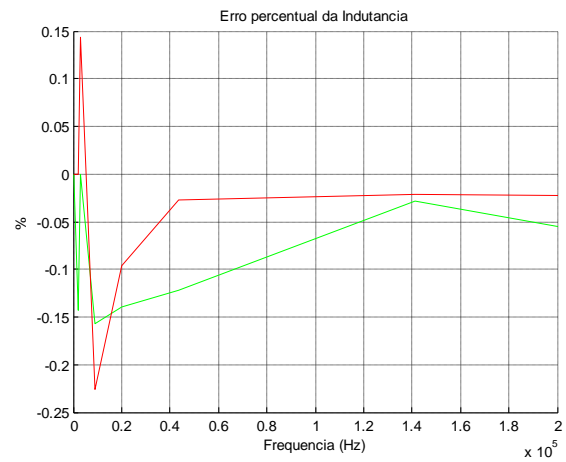


(b)

Figura 5.1. Variação da indutância (a) e da resistência (b) com a frequência. Curva em vermelho: modelagem com 6 ramos. Curva em verde: modelagem com 5 ramos.

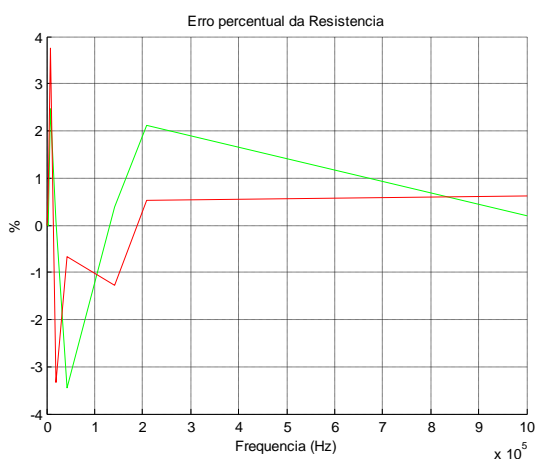


(a)

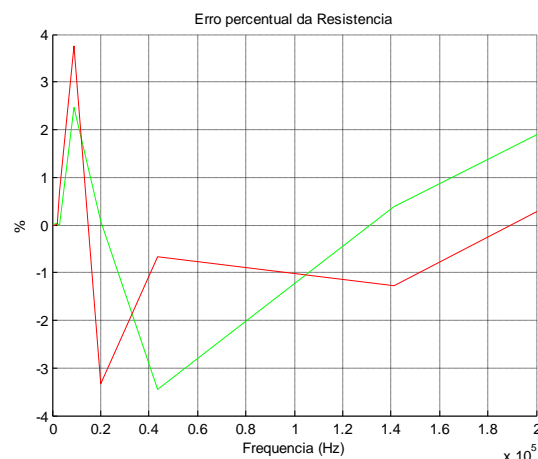


(b)

Figura 5.2. (a): Erros percentuais da indutância para 5 ramos (curva verde) e para 6 ramos (curva vermelha). (b): Zoom da figura da esquerda, ressaltando os erros percentuais para frequências mais baixas.



(a)



(b)

Figura 5.3. (a): Erros percentuais da resistência para 5 ramos (curva verde) e para 6 ramos (curva vermelha). (b): Zoom da figura da esquerda, ressaltando os erros percentuais para frequências mais baixas.

Conforme dito anteriormente, a quantidade de células "pi" presentes no circuito "N-ramos" aumenta o esforço computacional e, em algumas situações, pode tornar a simulação inviável. Neste sentido, se faz necessário realizar o cálculo da mínima quantidade de células "pi", cuja conexão em cascata, reproduza de forma satisfatória a natureza distribuída dos parâmetros do cabo. A metodologia para o cálculo da quantidade adequada de células a serem utilizadas pode ser encontrada em [1], mas encontra-se resumida na seqüência.

O número de células "pi" a ser utilizada é determinado baseando-se na idéia de que o campo eletromagnético estabelecido ao longo da linha não pode sofrer uma variação significativa num trecho correspondente ao comprimento elétrico de uma célula "pi". Tendo em mente essa questão, apresenta-se abaixo a metodologia empregada para se obter a quantidade de células "pi's" no circuito "N-ramos" necessária para reproduzir o efeito da variação dos parâmetros do cabo com a frequência:

- Cálculo da frequência associada ao tempo de subida do pulso.
- Cálculo das matrizes de impedância e admitância do cabo através da rotina "cable constants – ATP", na frequência calculada no item anterior.
- Cálculo dos parâmetros de seqüência positiva.
- Cálculo da velocidade de propagação do pulso.

- Cálculo do comprimento de onda associado à velocidade de propagação do pulso e a frequência obtida no primeiro item.
- Cálculo do comprimento elétrico de cada célula "pi" no circuito "N-ramos".

A tabela 5.1 mostra os valores das grandezas de seqüências positiva e zero para o cabo em questão, assim como a velocidade de propagação do pulso e o menor comprimento de onda presente no cabo.

Tabela 5.1: Valores das grandezas de seqüência calculados a partir das matrizes de impedância e de admitância fornecidas pela rotina "cable constants" do ATP:

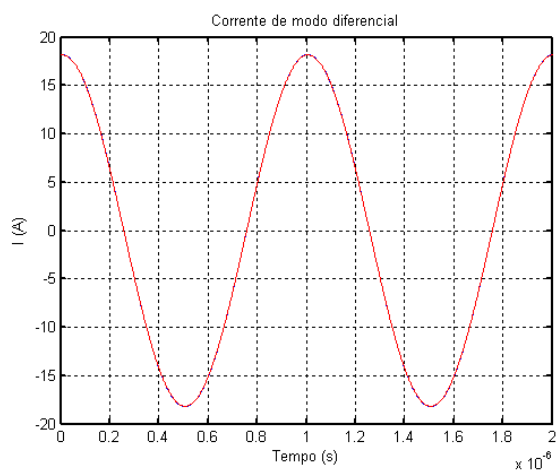
Parâmetros de seqüência s do cabo	
Tempo de subida do pulso (ns)	200
Frequência associada ao tempo de subida (MHz)	1,59
Capacitância seqüência positiva (pF/m)	568,31
Capacitância seqüência zero (pF/m)	220,01
Resistência seqüência positiva (Ω/m)	0,01
Resistência seqüência zero (Ω/m)	0,01
Indutância seqüência positiva ($\mu H/m$)	0,1
Indutância seqüência zero ($\mu H/m$)	0,26
Velocidade de propagação do pulso (m/s)	$1,32 \times 10^8$
Menor comprimento de onda (m)	83

No caso do sistema em análise, o cabo que interliga o conversor ao motor apresenta comprimento de 480 metros. Considerando-se que o comprimento elétrico da célula "pi" deve ser pelo menos dez vezes menor que o menor comprimento de onda presente no cabo, o seu valor, para o presente caso, será igual a 8 metros. Dessa forma, a quantidade (mínima) de células que devem ser associadas em cascata para reproduzir adequadamente a natureza distribuída dos parâmetros do cabo, será igual a 60.

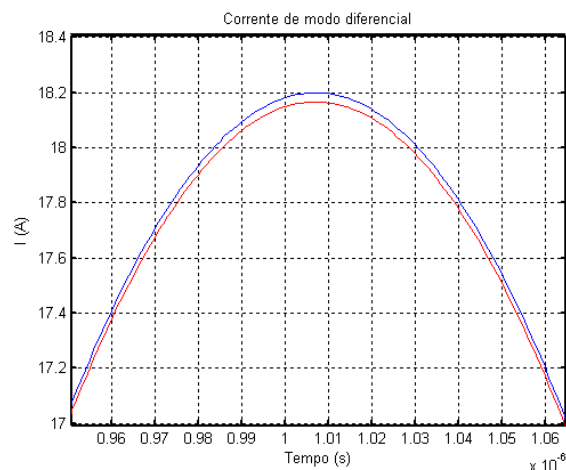
Uma vez determinados os parâmetros que irão compor o circuito "N-ramos" e a quantidade de células "pi's", obtém-se a modelagem completa do cabo coaxial supracitado. No entanto, a fim de verificar se tal modelagem está realmente representando de forma satisfatória as impedâncias de seqüência positiva (relacionadas ao cabo) e as impedâncias mútuas (relacionadas à terra), para algumas freqüências entre 400 Hz e 1 MHz, foram conduzidas simulações na plataforma Simulink – MATLAB® nas quais as correntes dos modos diferencial e comum de dois circuitos "pi's" distintos que representam 80 metros do cabo em análise são comparadas. Em um desses circuitos, as impedâncias do cabo e aquela relacionada à terra foram obtidas para um valor fixo de freqüência; o outro circuito, aquele cuja modelagem se deseja verificar, os parâmetros série que modelam as impedâncias do cabo e da terra são compostos por 5 ramos cada um conectados convenientemente para representar a variação das referidas impedâncias com a freqüência. Vale ressaltar que em ambos os circuitos, as impedâncias dos cabos e a da terra estão conectadas pela mesma associação de capacitâncias, as quais modelam os acoplamentos existentes entre os cabos e entre os mesmos e a terra.

Para a simulação apresentada na figura 5.4, foi aplicada uma tensão senoidal equilibrada, na freqüência de 1 MHz, simultaneamente aos circuitos descritos no parágrafo anterior. Neste caso, a tensão e a corrente de modo comum são nulas, permitindo, assim, a avaliação do circuito "N-ramos" utilizado na impedância série do cabo, o qual encontra-se curto-circuitado.

Para a simulação apresentada na figura 5.5, foi aplicada uma tensão senoidal desequilibrada, na mesma freqüência da anterior, simultaneamente aos mesmos circuitos supracitados. Assim, é possível avaliar o circuito "N-ramos" utilizado na impedância série da terra. Vale ressaltar que, considerando a elevada freqüência da fonte de tensão, os cabos em ambos os circuitos não foram curto-circuitados, forçando a circulação da corrente de modo comum através das capacitâncias de acoplamento.

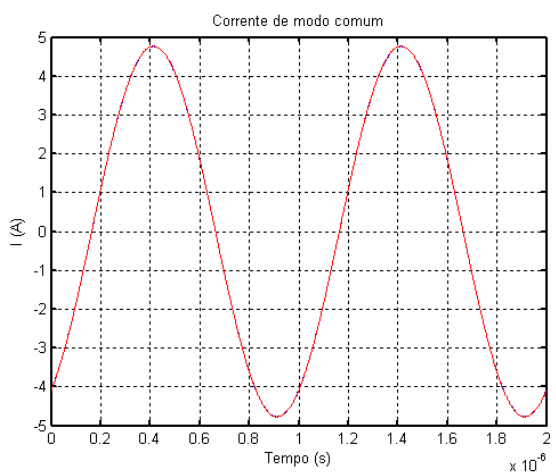


(a)

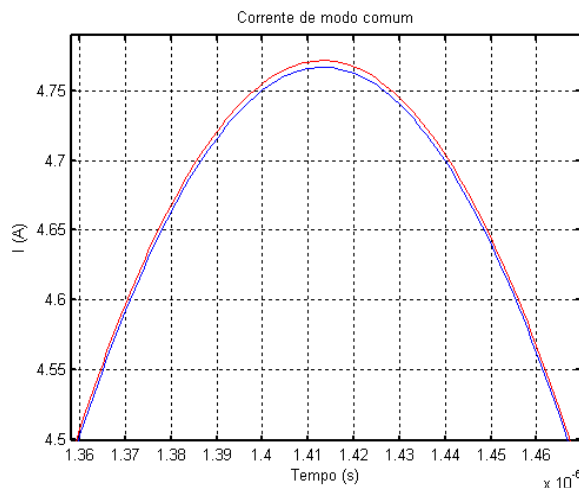


(b)

Figura 5.4. (a) Corrente da fase "a" do cabo, em curto-circuito: Curva em azul, referente ao modelo com 5 ramos utilizado para a impedância série do cabo; Curva em vermelho, referente ao modelo em que os parâmetros série correspondem exatamente à frequência de 1 MHz. (b) Zoom .



(a)



(b)

Figura 5.5. (a) Corrente de modo comum, cabo em aberto: Curva em azul, referente ao modelo com 5 ramos utilizado para a impedância série da terra; Curva em vermelho, referente ao modelo em que os parâmetros série correspondem exatamente à frequência de 1 MHz. (b) Zoom .

De acordo com os gráficos mostrados nas duas figuras acima, nota-se que os valores obtidos tanto para as correntes de fase quanto para as correntes de modo comum são praticamente idênticos, demonstrando a boa exatidão do circuito "N-ramos" tanto para representar o cabo quanto a terra.

5.2 Modelagem do conversor de frequência

A ponte inversora é a fonte das variações de tensão aplicadas entre as fases do cabo (tensão de modo diferencial) e entre as fases e o caminho de retorno pela terra (tensão de modo comum). Além disso, os acoplamentos capacitivos entre seus diversos componentes à terra representam um dos caminhos pelos quais as correntes de modo comum circulam, sendo os mais relevantes aqueles constituídos pelos IGBTs e pelo barramento CC [13]. Dessa forma, no caso do presente trabalho, o conversor foi modelado como uma fonte de pulsos de tensão, cuja forma de onda foi concebida de forma a resultar exatamente naquela gerada pelo conversor, ligada à terra através de uma capacitância equivalente, associada aos acoplamentos capacitivos supracitados.

O valor da capacitância das chaves do conversor ao dissipador de calor (aterrado) varia bastante em função da sua dimensão física, que é função da sua tensão e corrente. No caso do presente trabalho, o valor empregado para este parâmetro foi 30 nF.

5.3 Modelagem do transformador e do motor

Modelos de alta frequência para motores e transformadores devem incluir, forçosamente, os diversos acoplamentos capacitivos que se encontram naturalmente distribuídos entre suas partes constituintes, tais como aqueles entre espiras, entre bobinas, entre bobinas e carcaça, entre estator e rotor (no caso de motores) e primário e secundário (no caso de transformadores), dentre outras. Apesar do maior número de elementos, tem-se que o circuito elétrico equivalente

para a representação destes equipamentos em altas frequências é simples, sendo que a grande dificuldade reside é na obtenção do valor de tais parâmetros.

Há duas grandes famílias de modelos para este propósito, comumente denominados na literatura como "modelos físicos" e modelos do tipo "caixa preta". Nos primeiros, tais acoplamentos capacitivos vão sendo incorporados no circuito equivalente segundo a sua existência (ou correspondência) no equipamento real, ou seja, cada capacitância, por exemplo, está diretamente associada a um acoplamento existente entre algum par de componentes do dispositivo em análise. A grande dificuldade de utilização de tais modelos encontra-se justamente na medição ou cálculo analítico do valor de cada capacitância acrescentada. Já os modelos do tipo "caixa preta" são obtidos através da medição da resposta em frequência do equipamento a partir de uma ponte RLC, cuja curva de impedância e/ou admitância em função da frequência é posteriormente utilizada para a síntese de circuitos elétricos RLC, cuja resposta em frequência se assemelhe àquela medida. Sendo assim, os elementos de tais circuitos não guardam, necessariamente, uma correlação física com os parâmetros do equipamento real.

De qualquer forma, ambos os tipos de modelagem requerem a execução de medições no equipamento, o que não foi possível realizar no presente trabalho. Não obstante, é possível se encontrar na literatura, trabalhos onde motores de diferentes potências, assim como transformadores [14] tiveram seus parâmetros medidos e seus circuitos elétricos para altas frequências determinados. É preciso ressaltar, contudo, que as potências dos equipamentos analisados em tais referências são inferiores àquelas presentes nos sistemas em análise. Além disso, os parâmetros de alta frequência dos motores e transformadores são também influenciados pelos aspectos construtivos dos mesmos. Assim, equipamentos de mesma potência não apresentam necessariamente a mesma resposta em frequência.

Neste contexto, dada a impossibilidade de se realizar as medições no motor e no transformador a fim de realizar a síntese dos seus respectivos circuitos equivalentes de alta frequência e a ausência de trabalhos que apresentassem

parâmetros para equipamentos de mesma potência daqueles presentes no sistema real, optou-se por utilizar, no caso do transformador, o circuito equivalente apresentado em [14] com os parâmetros do equipamento de maior potência apresentado nessa referência, qual seja, 150 kVA.

No caso do motor optou-se por utilizar o circuito equivalente de alta frequência apresentado em [15]. Para o presente caso, aqueles parâmetros do circuito em questão que dependem fortemente dos aspectos construtivos da máquina foram extraídos do equipamento de maior potência da referência citada acima, qual seja, 40hp. Os demais parâmetros, a indutância de dispersão e a capacitância entre os enrolamentos e a terra foram obtidas diretamente do fabricante da máquina utilizada no sistema de acionamento em análise. Vale destacar, contudo, que tais parâmetros correspondem à frequência industrial, sendo assim, o valor da indutância utilizado encerra uma pequena imprecisão devido à sua variação com a frequência; tal fato, entretanto, não ocorre com a capacitância.

Vale ressaltar que os circuitos equivalentes apresentados tanto para o transformador quanto para o motor mostraram-se adequados ao estudo de fenômenos de alta frequência, conforme foi verificado nas comparações entre as respostas em frequências medidas e simuladas para os respectivos modelos nas suas correspondentes referências bibliográficas.

As figuras 5.6 e 5.7 ilustram os circuitos elétricos do transformador e do motor, respectivamente, apropriados para a sua representação em estudos de alta frequência.

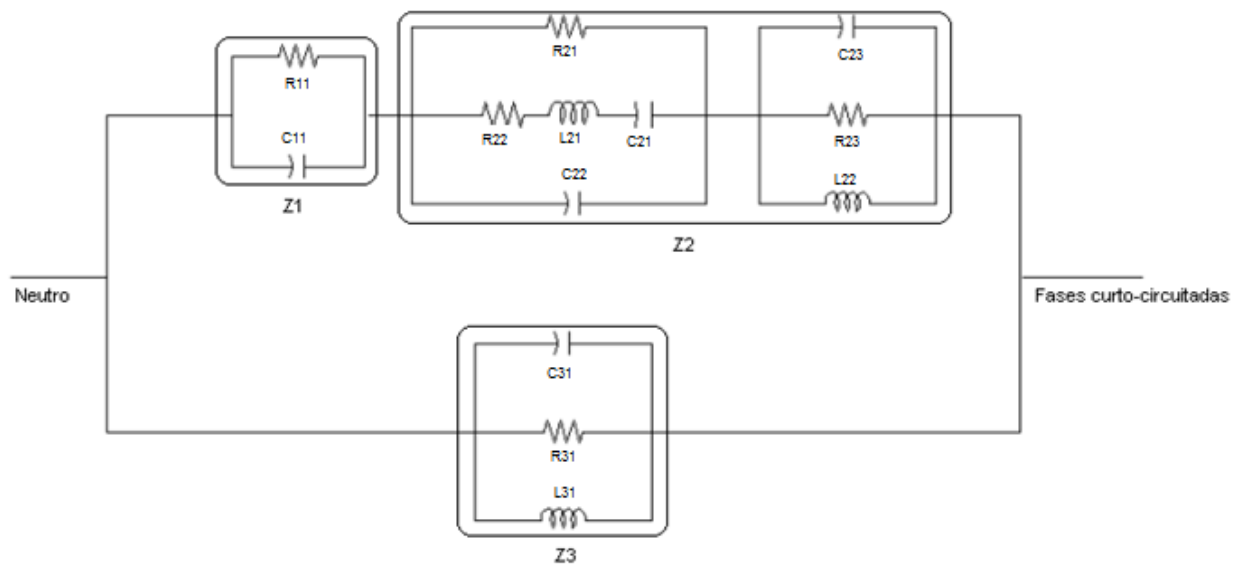


Figura 5.6. Circuito equivalente para o transformador empregado na análise de fenômenos de alta frequência, figura extraída de [16]

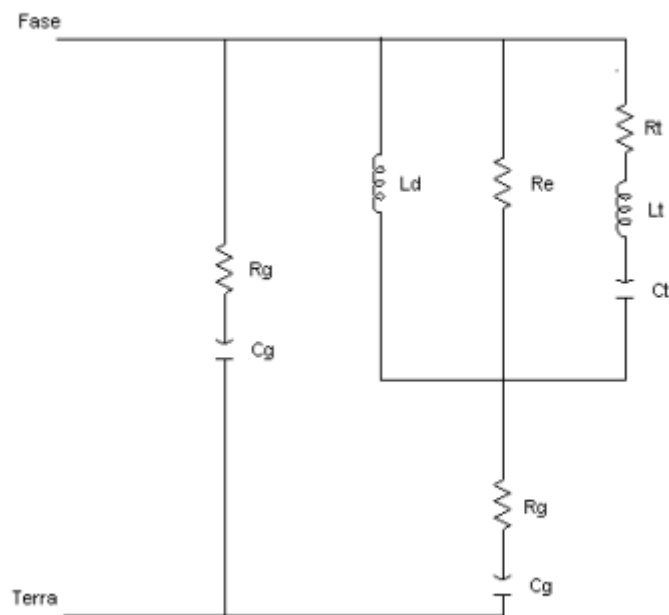


Figura 5.7. Circuito equivalente para o motor empregado na análise de fenômenos de alta frequência, figura extraída de [15].

Reportando a figura 5.6, as impedâncias Z_1 , Z_2 e Z_3 modelam o transformador para a análise de fenômenos de alta frequência de modo comum. Os valores das impedâncias supracitadas são estimados através de medições da tensão e da corrente quando as três fases do lado de baixa, curto-circuitadas, são alimentadas por uma fonte de tensão, o neutro é aterrado e os terminais do lado de alta são mantidos em aberto, tal como ilustra a figura 5.8.

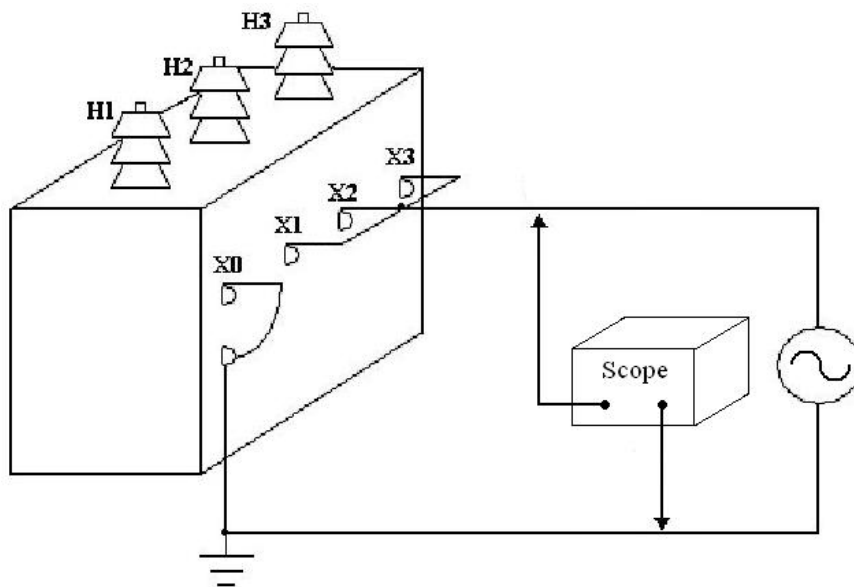


Figura 5.8. Ensaio para medir a impedância de modo comum do transformador.

Reportando a figura 5.7, a representação física que cada um dos parâmetros encerra assim como o cálculo analítico dos mesmos encontram-se descritos em [15]. Contudo, as informações mais relevantes sobre tais parâmetros, encontram-se listadas na seqüência:

- A conexão série dos parâmetros concentrados R_t , L_t e C_t são aqueles que dependem fortemente dos aspectos construtivos da máquina apresentando correlação com a capacitância entre as espiras. Dessa forma, os valores desses parâmetros não apresentam uma correspondência direta com a potência do equipamento em questão.
- A resistência R_e contabiliza as perdas introduzidas pela corrente de *Foucault*.

- A indutância L_d modela o fluxo de dispersão.
- A resistência R_g representa os efeitos dissipativos presentes no motor.
- A capacitância C_g modela o acoplamento capacitivo entre os enrolamentos do motor e a terra.

A tabela 5.2 mostra os valores dos parâmetros utilizados nos circuitos equivalentes do motor e do transformador empregados no sistema de acionamento em análise.

Tabela 5.2: Valores dos parâmetros utilizados nos circuitos equivalentes do motor e do transformador no sistema de acionamento em foco.

Circuito equivalente do motor		Circuito equivalente do transformador			
R_t (Ω)	100	R_{11} (k Ω)	110	C_{23} (pF)	500
L_t (mH)	0,48	C_{11} (pF)	600	L_{21} (mH)	0.005
C_t (pF)	26,1	R_{21} (k Ω)	100	L_{22} (mH)	14
R_e (Ω)	2500	R_{22} (k Ω)	100	R_{31} (k Ω)	0,35
L_d (mH)	1,116	R_{23} (k Ω)	11	C_{31} (pF)	400
R_g (Ω)	12	C_{21} (pF)	10000	L_{31} (mH)	0,015
C_g (nF)	18	C_{22} (pF)	1300		

5.4 Resultados obtidos das simulações

Com o intuito de verificar a influência de alguns elementos no circuito, foram simuladas duas situações distintas, sendo que na primeira o sistema não continha o reator na saída do conversor de frequência e nem o resistor de aterramento instalado no neutro do transformador. Na segunda situação tais elementos foram adicionados ao circuito e os resultados, bem como os comentários de ambas situações estão descritos nos próximos subitens.

5.4.1 Resultados da simulação do sistema sem a utilização do reator na saída do conversor e sem resistor de aterramento no neutro do transformador

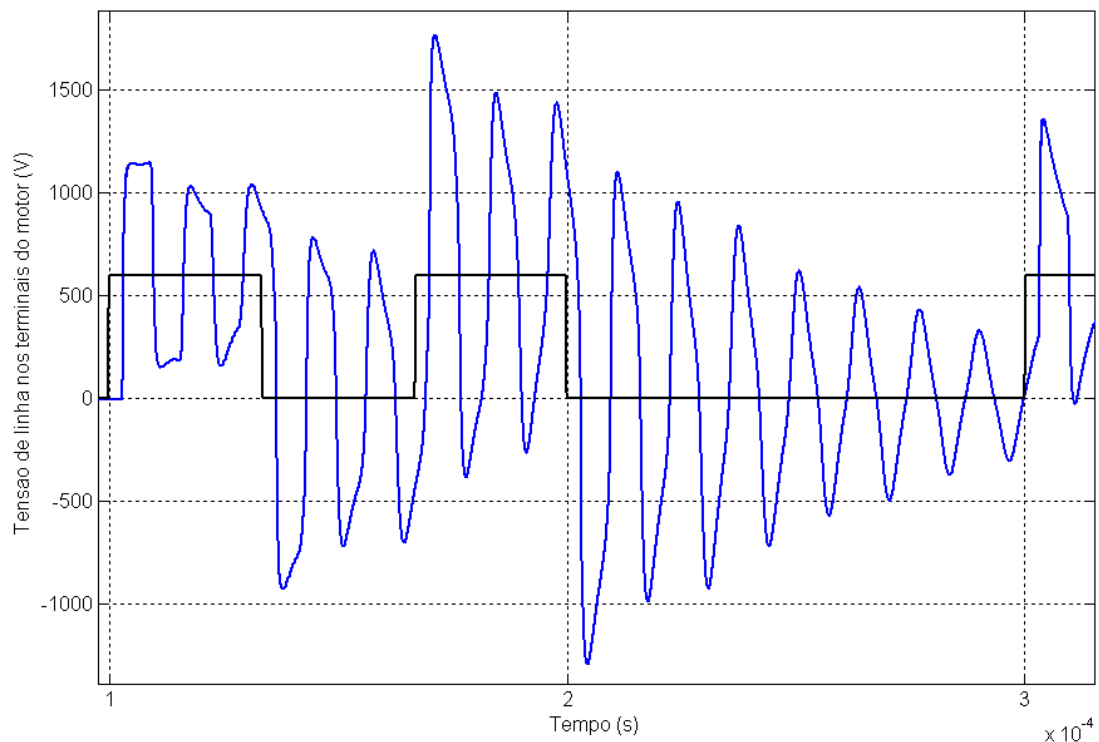


Figura 5.9: Tensão na saída do inversor (início do cabo), em preto, e nos terminais do motor (final do cabo), em azul.

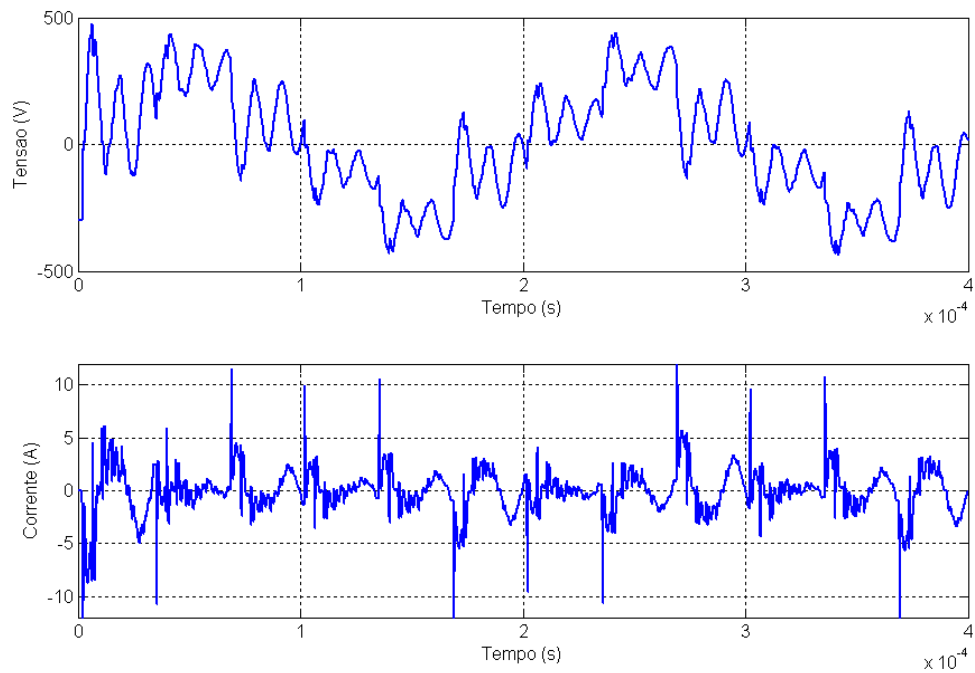


Figura 5.10: Tensão de modo comum nos terminais do motor e corrente de modo comum do motor (fluindo de sua carcaça para o ponto de aterramento)

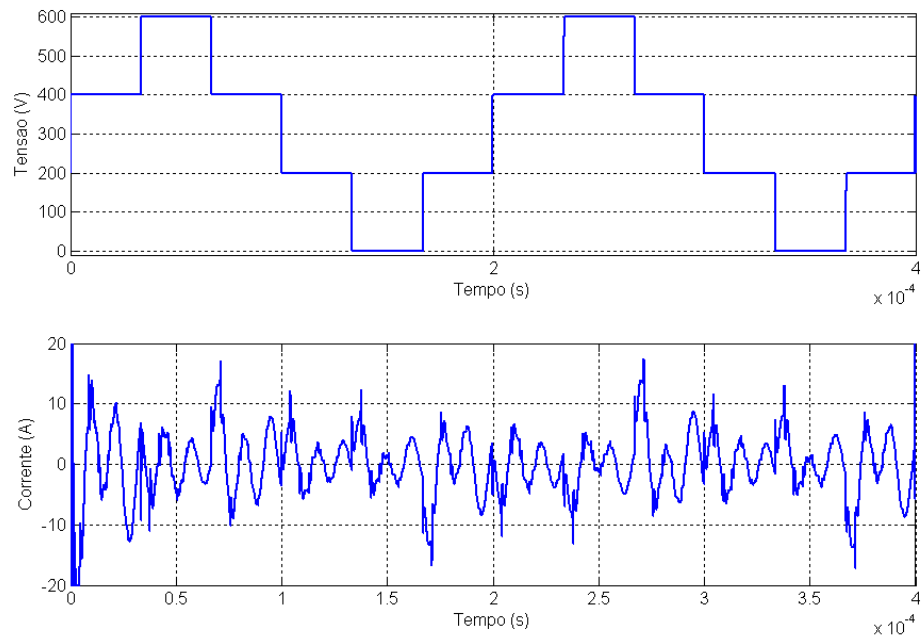


Figura 5.11: Tensão de modo comum nos terminais do inversor e corrente de modo comum total do sistema (combinação das correntes que retornam pelo trafo e pelo conversor)

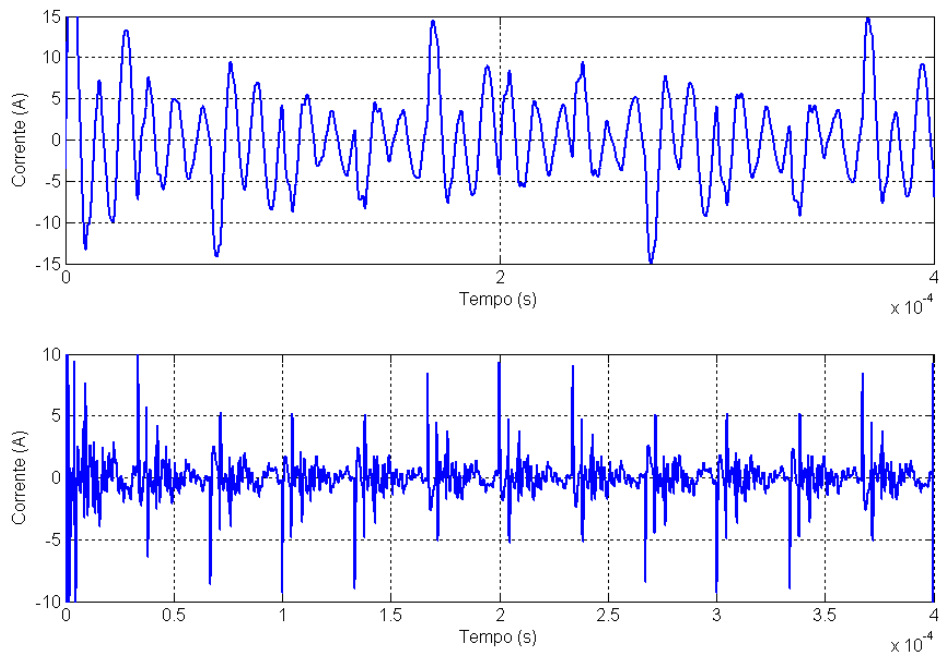


Figura 5.12: curva superior: corrente retornando pelo transformador / curva inferior: corrente retornando pelo acoplamento capacitivo do inversor

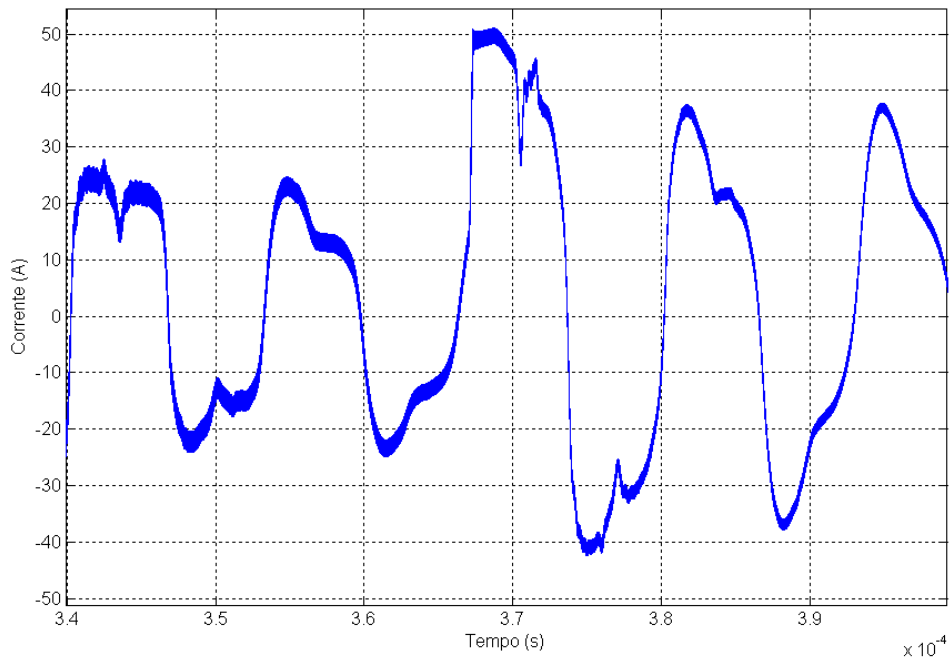


Figura 5.13: Corrente de carga do cabo.

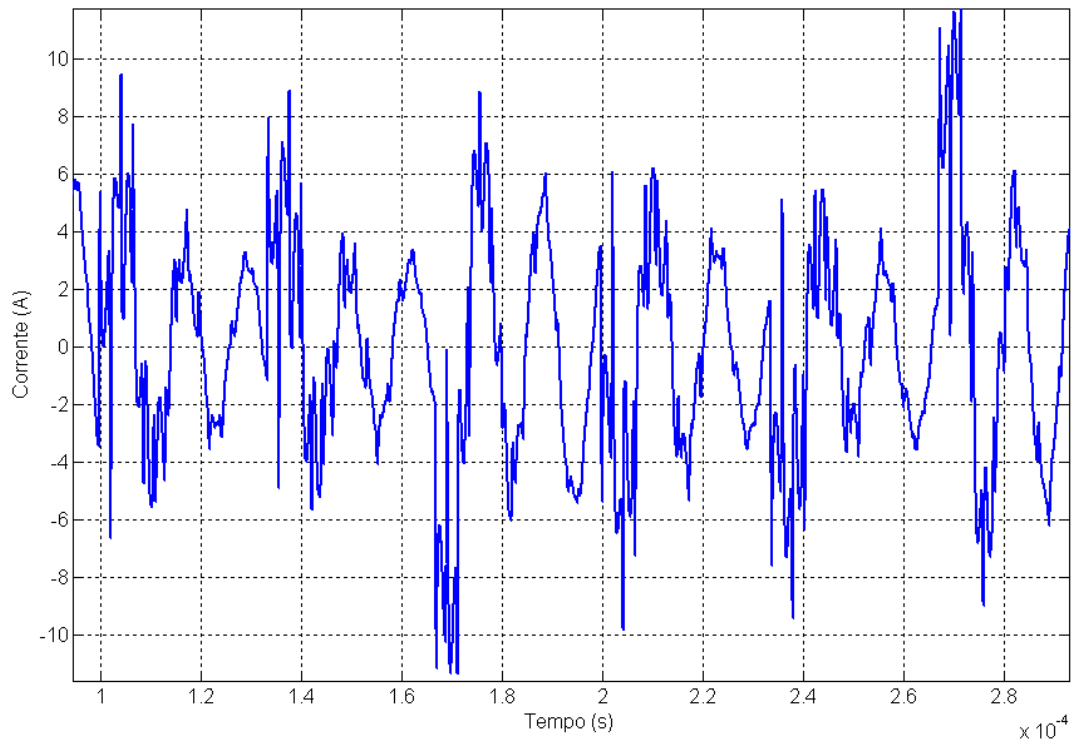


Figura 5.14: Corrente que flui dos condutores para a terra.

Com relação aos resultados obtidos, cabem os comentários apresentados na seqüência.

Nota-se que as oscilações da tensão nos terminais do motor encontram-se muito fracamente amortecidas, resultando inclusive na sobreposição de efeitos de transitórios gerados por pulsos vizinhos, culminando em picos superiores a 2 p.u. (1 p.u. corresponde à tensão no barramento CC). Tais picos elevados ocorrem na prática em algumas situações particulares, tais como nos primeiros pulsos de um novo ciclo, cuja duração e espaçamento não são suficientemente longos para o completo amortecimento do transitório quando um novo dv/dt é gerado. Todavia, no caso da figura 5.9, tem-se que a redução da amplitude das oscilações de tensão encontra-se de fato bastante diferente daquela observada na prática, o que pode ser explicado por dois motivos:

- (i) A modelagem do cabo não inclui o efeito proximidade (apenas o pelicular),

o qual é responsável por uma elevação substancial da resistência do cabo, conforme mostrado em [12]. Assim sendo, caso o mesmo tivesse sido incorporado quando da determinação dos parâmetros do modelo do cabo, o amortecimento das oscilações seria bem mais pronunciado.

- (ii) Os parâmetros do motor utilizados no modelo, mais especificamente a sua capacitância dos enrolamentos para a terra, assim como a sua indutância de dispersão, os quais são predominantes na definição de sua impedância de surto, resultaram num valor para esta grandeza de aproximadamente 149Ω , que, associado à impedância característica do cabo de $8,67 \Omega$, resulta num coeficiente de reflexão na junção cabo-motor de cerca de 0,89, enquanto o valor esperado, para um motor dessa potência, seria de aproximadamente 0,7. Por essa razão, as ondas refletidas geradas nos terminais do motor, na simulação, apresentaram pouca redução em sua amplitude em cada viagem em cada viagem pelo cabo, fazendo com que as oscilações tivessem uma redução em sua amplitude significativamente menor que a encontrada na prática.

Comparando-se as figuras 5.10 e 5.11, observa-se que a tensão de modo comum, de forma semelhante à tensão entre as fases do motor, também apresenta oscilações transitórias no final do cabo, também fruto do fenômeno da propagação e reflexão de ondas. Todavia, como a velocidade de propagação e a impedância característica do cabo e do motor nesse modo são diferentes daquelas do modo diferencial, a amplitude das oscilações, assim como a sua frequência, também são diferentes, comparativamente às sobretensões transitórias entre as fases do motor.

Ainda que com perfis e frequências de oscilação diferentes, as correntes de modo comum do motor e total do sistema apresentam picos superiores a 10 A. A parcela da corrente de modo comum total que retorna pelo neutro do transformador atinge picos de 15 A, ao passo que aquela que flui pelo acoplamento capacitivo do conversor à terra apresenta amplitude máxima de cerca de 10 A. A corrente transitória de modo diferencial do cabo, também chamada de corrente de carga do

cabo, associada ao carregamento e descarregamento sucessivo da capacitância entre seus condutores em cada dv/dt da tensão correspondente, apresentou picos de 50 A, conforme mostra a figura 5.13. Já a corrente de modo comum do cabo, que flui de suas capacitâncias para a terra, tem oscilações transitórias cujos picos podem ultrapassar 10 A.

5.4.2 Resultados da simulação do sistema com a utilização do reator na saída do conversor e com resistor de aterramento no neutro do transformador

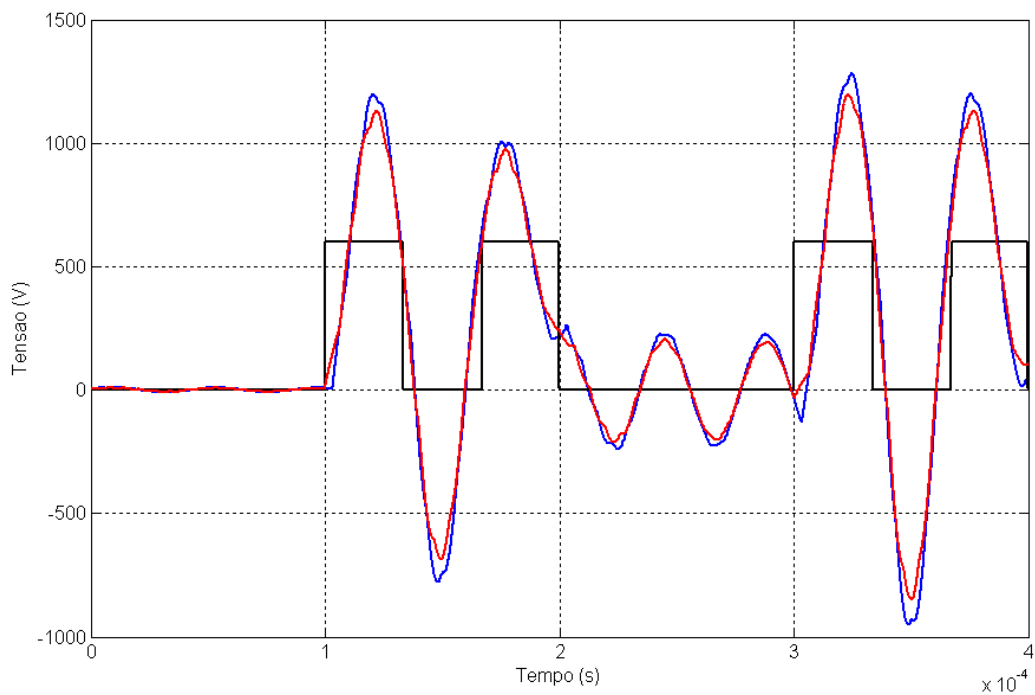


Figura 5.15: Tensão na saída do inversor (início do cabo), em preto, e nos terminais do motor (final do cabo), em azul.

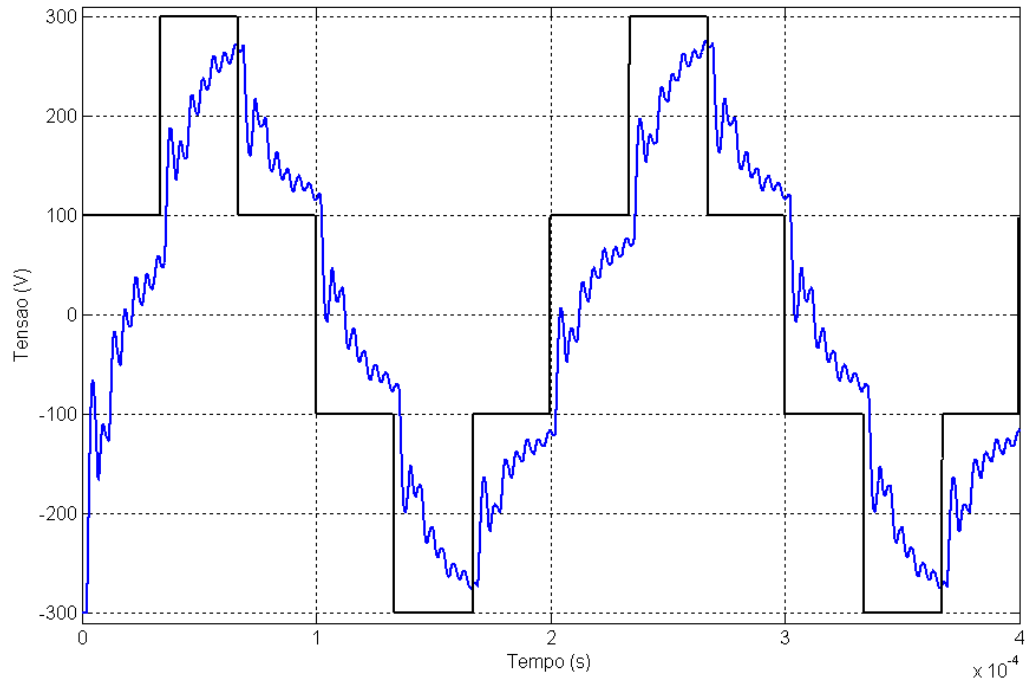


Figura 5.16: Tensão de modo comum nos terminais do inversor (preto) e do motor (azul).

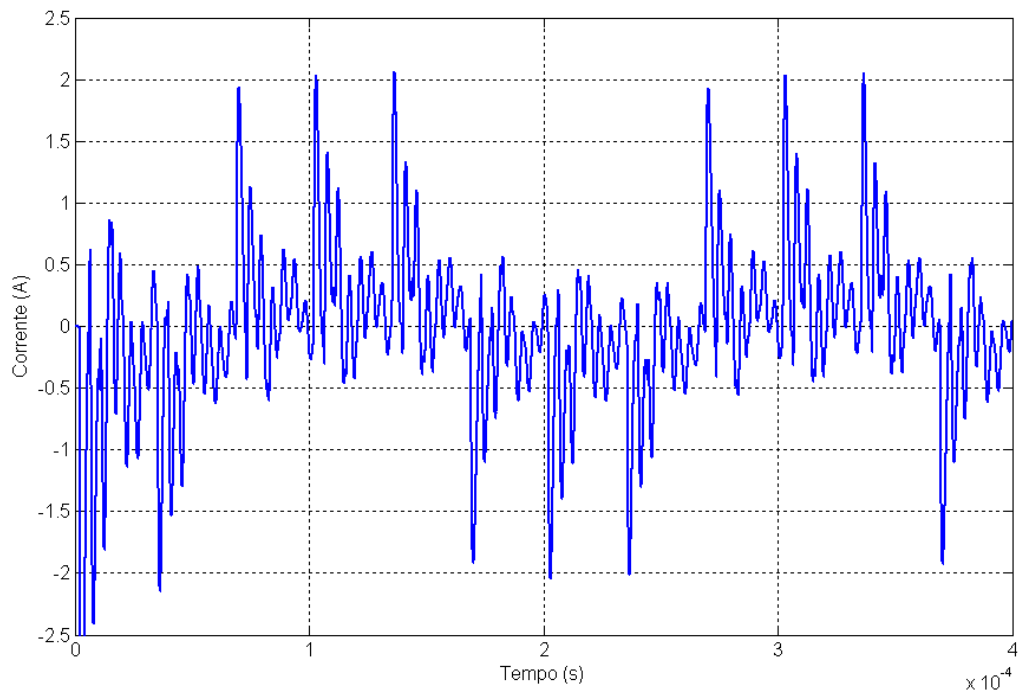


Figura 5.17: Corrente de modo comum do motor (fluindo de sua carcaça para o ponto de aterramento)

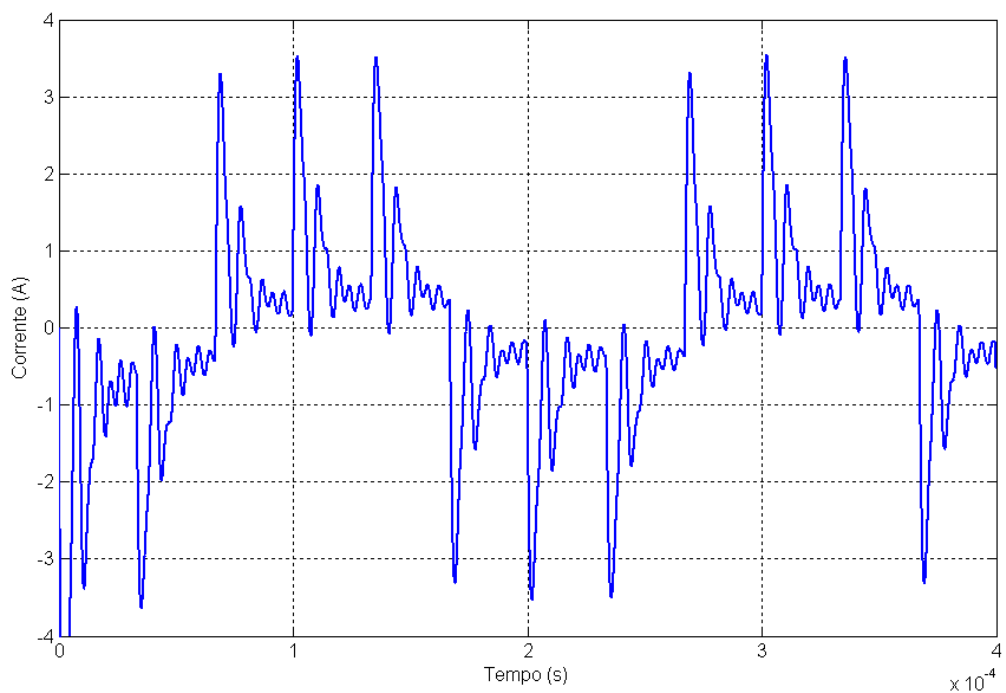


Figura 5.18: Corrente de modo comum total do sistema (combinação das correntes que retornam pelo trafo e pelo conversor)

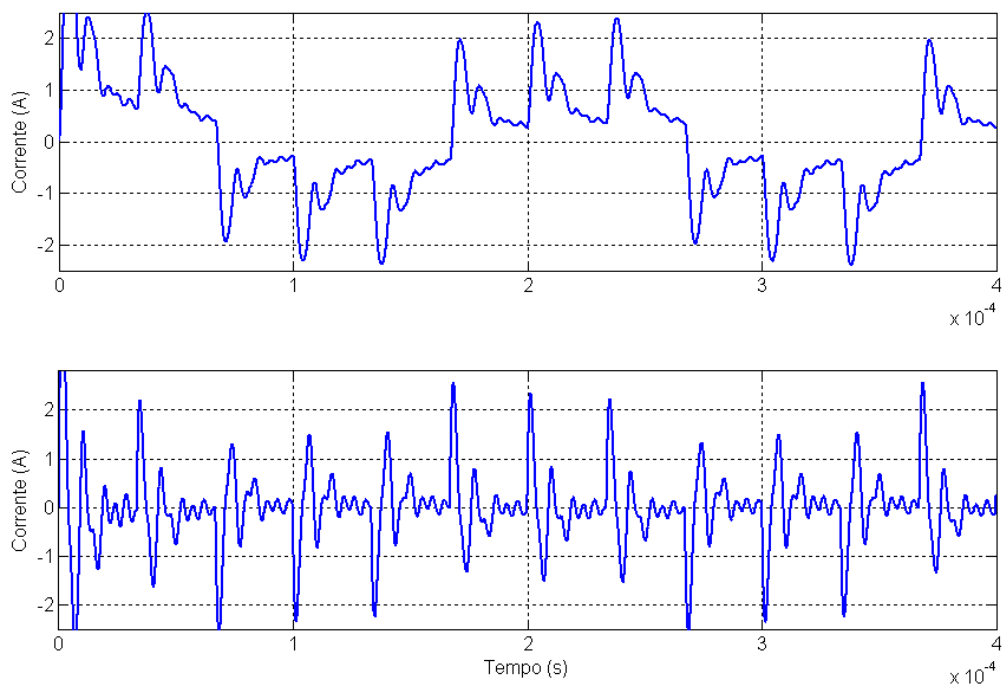


Figura 5.19: curva superior: corrente retornando pelo transformador / curva inferior: corrente retornando pelo acoplamento capacitivo do inversor

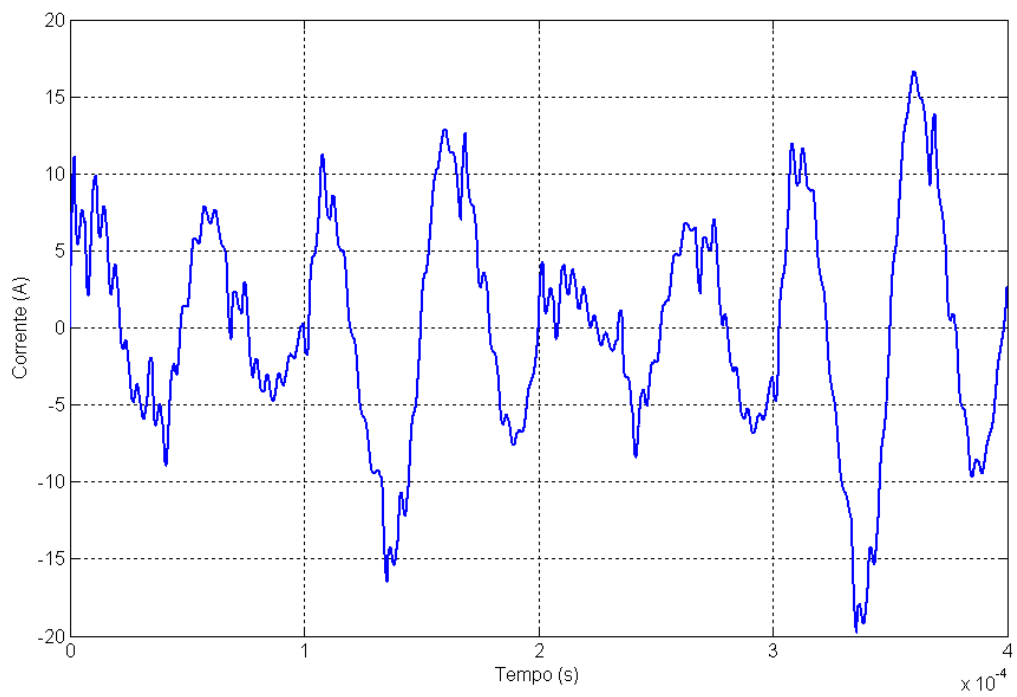


Figura 5.20: Corrente de carga do cabo.

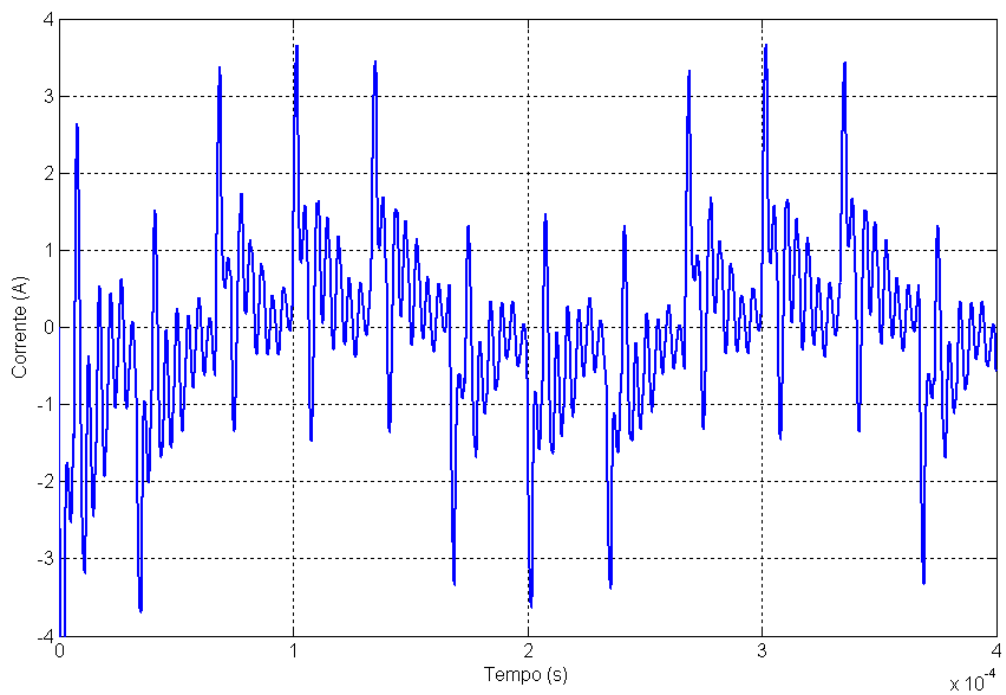


Figura 5.21: Corrente que flui dos condutores para a terra.

A respeito dos resultados do obtidos acima, tem-se os seguintes comentários apresentados na seqüência.

Analisando a figura 5.15, nota-se que a inclusão do reator no sistema reduziu significativamente a sobretensão nos terminais do motor, sendo que anteriormente as mesmas atingiam picos superiores a 1500 V e agora tais picos estão na faixa de 1200 V. Conforme explicado anteriormente, tais picos encontram-se em patamares tão elevados devido a modelagem do cabo não incluir o efeito de proximidade e os parâmetros utilizados para a modelagem do motor resultarem em um coeficiente de reflexão superior ao esperado. Um fato muito importante a ser mencionado é que a inclusão do reator no sistema resultou na criação de um circuito ressonante constituído pelo mesmo e a capacitância equivalente do cabo, o qual, excitado pelos pulsos PWM, gerou novas oscilações de tensão, fracamente amortecidas. Na figura em questão, a curva em vermelho indica a tensão na saída do reator (início do cabo) e a curva em azul indica a tensão nos terminais do motor (fim do cabo). Tais curvas possuem forma e valor bastante parecidos, indicando que neste caso a sobretensão não está ocorrendo devido o grande comprimento do cabo, já que as tensões são praticamente as mesmas no início e fim do mesmo, mas devido à ressonância fracamente amortecida gerada pela inclusão do reator.

Analisando a figura 5.16, observa-se que, a exemplo da simulação anterior, a tensão de modo comum apresenta oscilações transitórias no final do cabo devido o fenômeno da propagação e reflexão de ondas, conforme já mencionado. Como era esperado, a inserção do reator na saída do conversor de frequência reduziu a tensão de modo comum nos terminais do motor e as correntes de modo comum que circulam pelo sistema.

Comparando as correntes de modo comum do caso atual com o anterior, nota-se que houve uma considerável redução dos valores simulados. Analisando as figura 5.17 e 5.18, tem-se que a corrente de modo comum do motor apresenta picos de corrente da ordem de 2 A e a corrente total do sistema tem picos da ordem de 3,5

A, enquanto no caso anterior tais correntes atingiam valores superiores a 10 A. É notável também a redução das correntes que circulavam pelo neutro do transformador e pelo acoplamento capacitivo do conversor, cujos valores eram de 15 A e 10 A respectivamente, e passaram para patamares da ordem de 2,5 A. A corrente de modo comum que circula pela capacitância existente entre os condutores e a terra teve seu valor reduzido de 10 A para 3,5 A, conforme mostra a figura 5.20, enquanto que a corrente de modo diferencial que circula entre os condutores, conhecida como corrente de carga do cabo, sofreu uma redução de 50 A para 15 A, conforme ilustrado na figura 5.19.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho discorreu sobre os fenômenos de alta frequência presentes em um sistema de acionamento que utiliza conversores de frequência PWM. As elevadas frequências de chaveamento e rápidos tempos de subida dos pulsos de tensão gerados pelo conversor de frequência, associados a cabos de grande comprimento, resultam em sobretensões nos terminais do motor. Além disso, tais conversores são responsáveis pela geração de correntes de modo comum, que circulam entre os condutores e a terra, e correntes de modo diferencial, que circulam entre os cabos de alimentação do motor.

Neste contexto, foram selecionados dois sistemas de acionamento presentes em atividades de mineração e pelotização, visto que tais sistemas utilizam cabos de grande comprimento interligando o conversor ao motor. Foram descritos os processos nos quais tais motores trabalham e abordado todo o sistema elétrico envolvido, inclusive o aterramento existente, desde o transformador até o motor. É válido lembrar que neste trabalho foi simulado apenas o motor que opera na planta de pelotização, sendo que o sistema presente na planta de mineração foi aqui descrito como sugestão para trabalhos futuros.

Para efetuar a simulação, foi necessário fazer uma modelagem completa de todos os componentes que compõem o sistema, como o cabo de alimentação, o conversor de frequência, o transformador e o motor. Apesar do grande esforço para obtenção de todos os dados necessários, foi necessário utilizar alguns valores encontrados na literatura de equipamentos de potência diferente dos equipamentos reais, devido à impossibilidade de medição de tais parâmetros nos equipamentos em operação. Porém é válido ressaltar que os modelos adotados para os equipamentos mostraram-se adequados ao estudo de fenômenos de alta frequência.

Com o intuito de verificar a influência da utilização do reator na saída do conversor, foram simulados dois sistemas, sendo um com o reator e o outro sem este componente. Conforme esperado, a sobretensão nos terminais do motor e as

correntes de modo comum e diferencial que circulam pelo sistema tiveram seus valores reduzidos. Além disso, pode-se observar que a inserção do reator originou um circuito ressonante gerando oscilações de tensão fracamente amortecidas.

Os resultados da simulação mostraram valores acima do que se espera na prática e isto se deve a diversos fatores, como a utilização de valores de literatura para alguns equipamentos e não os valores reais, conforme já citado, e a modelagem do cabo não incluir o efeito proximidade. Neste contexto, os valores obtidos devem ser analisados de forma mais qualitativa, procurando observar a presença dos fenômenos de alta frequência no sistema, e não de forma quantitativa, através da análise dos valores em si.

Apesar dos valores obtidos serem superiores ao que se espera na realidade, o trabalho cumpriu seu papel, que era o de caracterizar a presença de fenômenos de alta frequência em sistemas de acionamento presentes em atividades de tratamento de minério.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DE PAULA, Helder, “Uma Nova Metodologia para Determinação dos Fenômenos de Alta Freqüência em Sistemas de Acionamento de Motores de Indução Através de Inversores PWM”. Tese de doutorado. UFU – Uberlândia, MG, 01/06/2005.
- [2] SAUNDERS, L. A., SKIBINSKI, G. L., EVON, S. T., KEMPKES, D. L., “Riding the Reflected Wave – IGBT Drive Technology Demands New Motor and Cable Considerations”. IEEE 43rd IAS Annual Meeting, pp. 75-84, September 1996.
- [3] DE CASTRO, Gleston F. Inversor de Freqüência – Conceitos e Técnicas de aplicação - Apostila.
- [4] FINLAYSON, P. T., “Output Filters for PWM Drives with Induction Motors”. IEEE Industry Applications Magazine, pp. 46-52, January/February 1998.
- [5] PERSON, E., “Transient Effects in Inverter Applications to Induction Motors”. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 28, n. 5, pp. 1095-1101, September/October 1992.
- [6] LEGGATE, D., PANKAU, J., SCHLEGEL, D., KERKMAN, R. J., SKIBINSKI, G. L., “Reflected Waves and Their Associated Current”. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, n. 6, pp. 1383-1392, November/December 1999.
- [7] SUWANKAWIN, S. et al., “Destruction by Charge Current and Its Solution for PWM Inverter Feeding Multiple Motors Through Long Cables”, IEEE 40^o IAS Annual Meeting, pp. 1382-1389, 2005.
- [8] 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 Correntes de Modo Comum em Sistemas de Acionamento de Motores por

Inversores”, Induscon – VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, agosto 2008, Poços de Caldas.

[9] DUTRA, R., “Beneficiamento de Minerais Industriais” - II Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, agosto 2006

[10] DA LUZ, A. B., LINS, F. A. F., “Introdução ao Tratamento de Minérios ”- capítulo 1, Comunicação Técnica elaborada para a 4ª Edição do Livro de Tratamento de Minérios, Pág. 3 a 16, dezembro 2004.

[11] DE PAULA, H., ANDRADE, D. A., Member, IEEE, CHAVES, M. L. R., DOMINGOS, J. L., FREITAS, M. A. A., “Methodology for Cable Modeling and Simulation for High-Frequency Phenomena Studies in PWM Motor Drives”, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, n. 2, pp. 744-752, March 2008.

[12] CIRINO, A. W., DE PAULA, H., MESQUITA, R. C.; SARAIVA, E., “Cable Parameter Variation due to Skin and Proximity Effects: Determination by means of Finite Element Analysis”, Industrial Electronics, 2009, IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE, pp – 4073-4079.

[13] DE PAULA, H., CARDOSO FILHO, B. J., DE SOUZA, W. L., OLIVEIRA, T. R., “Uma Proposta para a Modelagem de Inversores para o Estudo de Correntes de Modo Comum em Sistemas de Acionamento de Motores”, Induscon – IX Conferência Internacional de Aplicações Industriais, novembro 2010, São Paulo.

[14] PIANTINI, A., KANASHIRO, A. G., “Distribution Transformer Model for Calculating Transferred Voltages”, Proceedings of the International Conference in Lightning Protection (26th ICLP), pp. 429-434, Cracow, September, 2002.

[15] MOREIRA, A. F., "Modeling and Design of Filter Networks for Higher Power Converters Utilizing Fast Hard Switching Devices". Tese de Doutorado, University of Wisconsin, Madison - 2002.

[16] DE PAULA, H., LISBOA, M. V. C., GUILHERME, J. F. R., ALMEIDA, W. P., CHAVES, M. L. R., "Differential Overvoltages and Common-Mode Currents in PWM Motor Drives: The Influence of the Cable Arrangement on Their Characteristics", 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Porto - Portugal, 2009.