

Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Projeto de Filtros para Atenuação
de Correntes de Modo Comum e de Sobretensões
em Acionamentos de Motores Elétricos
Utilizando Inversores PWM**

Camila Caçado Flávio

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Alessandro Fernandes Moreira, PhD.

Belo Horizonte, 29 de setembro de 2010

A Marci e Marciano, meus pais.

A Laís e Samuel, meus irmãos.

Resumo

A utilização de inversores como fonte de alimentação de motores em grande parte dos acionamentos elétricos veio acompanhada de fenômenos indesejáveis, tais como sobretensão nos terminais do motor, circulação de correntes de modo comum e problemas de interferência eletromagnética. Os fatores determinantes de grande parte dos problemas advêm da alta frequência de chaveamento dos dispositivos semicondutores do inversor e da velocidade de comutação destes dispositivos. Há também outra característica determinante, que é a grande distância entre os centros de controle e o local de instalação dos motores, que causa o uso de cabos longos que se comportam como linhas de transmissão diante dos pulsos de saída do inversor.

Tais problemas vêm sendo estudados há aproximadamente duas décadas, onde análises resultaram em propostas viáveis de solução. Métodos que pudessem mitigar os problemas relacionados a sobretensão e correntes de modo comum de forma conjunta tornaram-se uma proposta interessante de análise. Dentre as técnicas de mitigação, metodologias que incluíssem filtros dv/dt na saída do inversor e topologias para minimização da circulação das correntes de modo comum foram analisadas por se configurarem como métodos tipicamente empregados em aplicações industriais.

Diante deste cenário, foi desenvolvido um modelo de simulação do sistema de acionamento, que procurou representar todos os elementos presentes no mesmo que têm influência direta nos problemas aqui tratados, afim de se configurar como método prático tanto de análise dos fenômenos de modo diferencial e modo comum como de comparação de desempenho de topologias de filtros dv/dt e modo comum.

O modelo foi desenvolvido utilizando o programa PSCAD/EMTDC[©] para análise de transitórios eletromagnéticos, e se configura como adequado e de fácil utilização. Dessa forma, o modelo computacional desenvolvido neste trabalho se apresenta como opção adicional ao desenvolvimento de metodologias e otimização no projeto de filtros.

Análises experimentais realizados no LAI (Laboratório de Aplicações Industriais) do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais corroboraram com a validação do sistema de simulação.

Abstract

The use of inverters in most of electrical motor drives applications has been accompanied by several undesirable effects, such as overvoltage at the motor terminals, circulation of common mode currents and electromagnetic interference problems. The determining factors for most of these problems come with the high switching speed and frequency of the semiconductor devices used in inverters. Another important factor is the long distance between the control centers and the place where the motors are installed, requiring the use of long cables between the inverter and the motor, resulting in transmission line effects to the inverter output pulses.

Such problems have been studied for about two decades, resulting in viable solution proposals. Methods that would mitigate problems related to overvoltage and common mode currents jointly became an interesting analysis proposal. Among the mitigation techniques, methodologies including dv/dt filters at the inverter output terminals and topologies to minimize the circulation of common mode currents were analyzed, once they configure typically methods employed in industrial facilities.

In this scenario, a drive system simulation model was developed to represent all system elements that have direct influence on the problems in focus, in order to configure itself as a practical method for analyzing the differential mode and common mode phenomena and a comparison method for dv/dt filters and common mode topologies performance.

The system model is developed in PSCAD/EMTDC[©] program for electromagnetic transients analysis, which is appropriate and very useful. Thus, the computational model developed in this work is presented as an additional option for methodologies development and optimization in filter design.

Experimental analysis performed in the "Laboratório de Aplicações Industriais" of the Electrical Engineering Department of the Universidade Federal de Minas Gerais come along to validate the simulation system.

Agradecimentos

Tenho muito a agradecer por esta conquista tão especial iluminada por Deus. Agradeço às várias pessoas que tive a felicidade de ter ao meu lado nesta etapa e que tornaram os obstáculos, por mais difíceis que fossem, quase imperceptíveis, por me apoiarem e me lembrarem do objetivo que iria conquistar.

Agradeço à minha família, por sempre me apoiar nas decisões, pessoais e profissionais, confiando nas minhas escolhas, caminhando comigo e iluminando minha vida. Aos meus pais, Marci (por tornar meu mundo sempre encantado) e Marciano (pelo exemplo de força, caráter e pelos preciosos conselhos). Meus pais, meus heróis. Aos meus irmãos: minha irmã Laís (pela infinita amizade, pelo incentivo e carinho) e meu irmão Samuel (pelo apoio e atenção).

Agradeço à minha Tia Ilídia (sempre presente no meu coração) e Isabela pela bondade e força.

Ao meu orientador, Prof. Alessandro Fernandes Moreira, pessoa de extrema importância na realização deste trabalho, a quem dedico maiores agradecimentos pela oportunidade, incentivo, paciência, compreensão e disponibilidade. Pessoa de extraordinárias qualidades e para mim um exemplo de mestre e profissional. Sua confiança e orientação foram capazes de fazer com que eu conquistasse um crescimento profissional que julgava, muitas vezes, inalcançável. Toda a minha admiração por sua honestidade e obstinação em fazer um mundo melhor.

Ao grande amigo, Vitor Raydan Diab, pela incrível e extremamente importante ajuda durante as medições experimentais, pela disponibilidade e apoio.

Ao Laboratório de Aplicações Industriais pelo suporte para desenvolver e somar conhecimentos ao patrimônio científico, incentivo e sobretudo aos amigos que encontrei e que me ajudaram bastante. Sendo todos os que compõem esta equipe de extrema importância na execução deste trabalho, agradeço especialmente aos alunos: Filipe Dias e Leonardo Müller, pelo vasto conhecimento técnico, atenção e profissionalismo.

Ao Prof. Hélder, pela fundamental ajuda e inúmeras contribuições teóricas e práticas.

Ao Prof. Wallace pelas preciosas contribuições.

Aos amigos que fiz durante o convívio acadêmico e que seguiram me apoiando e ajudando durante todo o desenvolvimento deste trabalho, Douglas Pedroso, João Américo e Igor Vieira.

Ao CNPQ pelo auxílio financeiro, através do fornecimento de bolsa durante o tempo de estudo e elaboração deste trabalho, de fundamental importância neste período.

Ao PPGEE, Arlete, Anete e todos os seus membros, pela acolhida, atenção e profissionalismo.

A todas as pessoas, mesmo que não mencionadas, que contribuíram com seus conhecimentos, conselhos e amizade para a realização desta conquista.

Sumário

Resumo	2
Abstract	3
Agradecimentos	4
1 Introdução	14
1.1 Relevância e Motivação	14
1.2 Contribuições	16
1.3 Organização do Texto	17
2 Revisão da Literatura	19
2.1 Sobretensões Transitórias nos Terminais dos Motores Elétricos	19
2.1.1 Análise das Sobretensões Transitórias	20
2.1.2 Discussão de Propostas de Minimização de Sobretensões	23
2.2 Circulação de Correntes de Modo Comum	26
2.2.1 Interferência Eletromagnética Conduzida	27
2.2.2 Tensão de Modo Comum em Sistemas Inversor - Cabo - Motor	28
2.2.3 Circulação das Correntes de Modo Diferencial e de Modo Comum	30
2.2.4 Tensão de Eixo e Correntes de Rolamento	32
2.2.5 Métodos e Técnicas para Minimização do Modo Comum em Sistemas de Acionamentos	34
2.3 Métodos Computacionais de Análise	40
2.4 Conclusões	42
3 Topologias de Filtros Passivos para Sobretensão Transitória e Correntes de Modo Comum	44
3.1 Filtro dv/dt	47
3.1.1 Critérios para Dimensionamento do Filtro dv/dt	48

3.2	Topologias de Filtro para a Atenuação Simultânea de Sobretensão e de Correntes de Modo Comum	52
3.2.1	Filtro RLC Conectado ao Barramento	53
3.2.2	Filtro RLC - Rede dupla	55
3.2.3	Filtro com Transformador de Modo Comum	58
3.2.4	Filtro com Tensão de Saída Senoidal	61
3.3	Conclusões	67
4	Desenvolvimento e Implementação do Modelo Computacional	69
4.1	Descrição do Sistema para Simulação	70
4.1.1	Modelos dos Cabos de Acionamento	72
4.1.2	Modelo do Sistema Retificador - Inversor	75
4.1.3	Modelo do Motor de Baixa e Alta Frequência	76
4.1.4	Topologias de Filtros Implementados na Simulação	77
4.2	Resultados de Simulações	81
4.3	Conclusões	97
5	Resultados Experimentais	99
5.1	Considerações Iniciais	99
5.2	Apresentação dos Resultados	99
5.3	Conclusões	110
6	Conclusão	112
6.1	Propostas de Continuidade	114
A	Formas de Aterramento	115
	Referências Bibliográficas	128

Lista de Figuras

2.1	Reator acoplado na saída do inversor - Objetivo: Aumento do tempo de subida do pulso de tensão	24
2.2	Filtro LC acoplado na saída do inversor - Objetivo: Aumento do tempo de subida do pulso de tensão	24
2.3	Filtro RLC acoplado na saída do inversor - Objetivo: Aumento do tempo de subida do pulso de tensão	25
2.4	Filtro RC acoplado na entrada do motor - Objetivo: Promover o casamento de impedâncias entre cabo e motor	25
2.5	Filtro RLC acoplado na entrada do motor - Objetivo: Promover o casamento de impedâncias entre cabo e motor	26
2.6	Sistema Inversor - Motor, simplificadaamente representado para visualização de cálculo da tensão de modo comum	28
2.7	Tensão de Eixo e Correntes de Rolamento	33
2.8	Correntes de modo comum e de modo diferencial em um par de condutores	36
2.9	Efeito do indutor de modo comum nas correntes de modo diferencial e modo comum	37
2.10	Circulação do modo comum em sistema com cabos não blindados distribuídos aleatoriamente e aterramento comum.	39
3.1	Filtro dv/dt	49
3.2	Considerações para Dimensionamento do Filtro dv/dt	52
3.3	Filtro RLC conectado ao Barramento de Corrente Contínua	54
3.4	Considerações para Dimensionamento do Filtro RLC conectado ao Barramento de Corrente Contínua	55
3.5	Filtro RLC Duplo	56
3.6	Considerações para Dimensionamento do Filtro RLC Duplo	58
3.7	Filtro dv/dt e Transformador de Modo Comum	59
3.8	Considerações para Dimensionamento do Filtro dv/dt e Transformador de Modo Comum	61

	9
3.9 Filtro com tensão de saída senoidal	62
3.10 Considerações para Dimensionamento do Filtro com tensão de saída senoidal - Filtro Diferencial	63
3.11 Circuito Equivalente para os Componentes de Modo Comum	65
3.12 Considerações para Dimensionamento do Filtro com tensão de saída senoidal - Filtro Modo Comum	66
4.1 Modelo proposto do sistema para implementação no PSCAD/EMTDC [©] , incluindo representação do motor para altas frequências [1]	71
4.2 Dimensões físicas do cabo implementado no PSCAD/EMTDC [©]	73
4.3 Filtro dv/dt [1]	78
4.4 Filtro dv/dt acoplado ao ponto médio do barramento de corrente contínua [2]	78
4.5 Filtro dv/dt acoplado aos pontos positivo e negativo do barramento de corrente contínua [3]	79
4.6 Filtro dv/dt acoplado ao ponto médio do barramento e indutor de modo comum	79
4.7 Locais onde foram feitas as medições das grandezas apresentadas	83
4.8 Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 20m e sem filtro. Tensões entre fases na saída do inversor e nos terminais do motor.	85
4.9 Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 20m e sem filtro. Tensão de modo comum nos terminais do motor e corrente de modo comum.	85
4.10 Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 100m e sem filtro. Tensões entre fases na saída do inversor e nos terminais do motor.	86
4.11 Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 100m e sem filtro. Tensão de modo comum nos terminais do motor e corrente de modo comum.	86
4.12 Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 20m e filtro dv/dt. Tensões entre fases na saída do inversor e nos terminais do motor.	87

	10
4.13 Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 20m e filtro dv/dt. Tensão de modo comum nos terminais do motor e corrente de modo comum	87
4.14 Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 100m e filtro dv/dt. Tensões entre fases na saída do inversor e nos terminais do motor.	88
4.15 Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 100m e filtro dv/dt. Tensão de modo comum nos terminais do motor e corrente de modo comum.	88
4.16 Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 20m e filtro acoplado ao barramento. Tensões entre fases na saída do inversor e nos terminais do motor.	89
4.17 Resultados de simulação para sistema com cabo de 20m e filtro acoplado ao barramento. Tensão de modo comum nos terminais do motor e corrente de modo comum.	89
4.18 Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 100m e filtro acoplado ao barramento. Tensões entre fases na saída do inversor e nos terminais do motor.	90
4.19 Resultados de simulação para sistema com cabo de 100m e filtro acoplado ao barramento. Tensão de modo comum nos terminais do motor e corrente de modo comum.	90
4.20 Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 20m e filtro acoplado aos pontos negativo e positivo do barramento. Tensões entre fases na saída do inversor e nos terminais do motor.	92
4.21 Resultados de simulação para sistema com cabo de 20m e filtro acoplado aos pontos negativo e positivo do barramento. Tensão de modo comum nos terminais do motor e corrente de modo comum.	92
4.22 Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 100m e filtro acoplado aos pontos negativo e positivo do barramento. Tensões entre fases na saída do inversor e nos terminais do motor.	93

4.23	Resultados de simulação para sistema com cabo de 100m e filtro acoplado aos pontos negativo e positivo do barramento. Tensão de modo comum nos terminais do motor e corrente de modo comum.	93
4.24	Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 20m, filtro acoplado e indutor de Modo Comum. Tensões entre fases na saída do inversor e nos terminais do motor.	94
4.25	Resultados de simulação para sistema com cabo de 20m, filtro acoplado e indutor de Modo Comum. Tensão de modo comum nos terminais do motor e corrente de modo comum.	94
4.26	Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 100m, filtro acoplado e indutor de Modo Comum. Tensões entre fases na saída do inversor e nos terminais do motor.	95
4.27	Resultados de simulação para sistema com cabo de 100m, filtro acoplado e indutor de Modo Comum. Tensão de modo comum nos terminais do motor e corrente de modo comum.	95
5.1	Sobretensão - Sistema sem filtro - cabo 20m. Tensões medidas na saída do inversor e nos terminais de entrada do motor, respectivamente.	101
5.2	Tensão e Corrente de Modo Comum, respectivamente - Sistema sem filtro - cabo 20m. Escala de corrente: 2A por divisão	101
5.3	Sobretensão - Sistema sem filtro - cabo 100m. Tensões medidas na saída do inversor e nos terminais de entrada do motor, respectivamente.	102
5.4	Tensão e Corrente de Modo Comum, respectivamente - Sistema sem filtro - cabo 100m. Escala de corrente: 2A por divisão	102
5.5	Sobretensão - Sistema com filtro - cabo 20m. Tensões medidas na saída do inversor e na entrada do motor, respectivamente.	103
5.6	Tensão e Corrente de Modo Comum - Sistema com filtro - cabo 20m - Escala 2A por divisão	103
5.7	Sobretensão - Sistema com filtro - cabo 100m. Tensões medidas na saída do inversor e na entrada do motor, respectivamente.	104
5.8	Tensão e Corrente de Modo Comum - Sistema com filtro - cabo 100m - Escala 2A por divisão	104

5.9	Sobretensão - Sistema sem filtro - cabo 20m. Tensões medidas na saída do inversor e na entrada do motor, respectivamente.	105
5.10	Sobretensão - Sistema sem filtro - cabo 100m. Tensões medidas na saída do inversor e na entrada do motor, respectivamente.	105
5.11	Tensão de Modo Comum - Sistema sem filtro - cabo 20m.	106
5.12	Corrente de Modo Comum - Sistema sem filtro - cabo 20m.	106
5.13	Sobretensão - Sistema filtro dv/dt - cabo 20m. Tensões medidas na saída do inversor e na entrada do motor, respectivamente.	107
5.14	Sobretensão - Sistema filtro dv/dt - cabo 100m. Tensões medidas na saída do inversor e na entrada do motor, respectivamente.	107
5.15	Tensão de Modo Comum - Sistema filtro dv/dt - cabo 20m.	108
5.16	Tensão de Modo Comum - Sistema filtro dv/dt - cabo 100m.	108
5.17	Corrente de Modo Comum - Sistema filtro dv/dt - cabo 20m.	109
5.18	Corrente de Modo Comum - Sistema filtro dv/dt - cabo 100m.	109
A.1	Circulação do modo comum em sistema com cabos não blindados distribuídos aleatoriamente e aterramento comum.	116
A.2	Instalação 1	122
A.3	Instalação 2	124
A.4	Instalação 3	125

Lista de Tabelas

3.1	Comparação entre Topologias de Filtros para Modo Diferencial e Modo Comum [4]	45
4.1	Parâmetros do Sistema [5, 6]	77
4.2	Comparação entre Topologias de Filtros para Modo Diferencial e Modo Comum segundo resultados observados na simulação	96

Capítulo 1

Introdução

1.1 Relevância e Motivação

O uso de inversores em sistemas de acionamento de motores elétricos veio acompanhado de vantagens amplamente conhecidas. A utilização de dispositivos semicondutores IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor) permitiu operações em alta frequência e melhorou o desempenho do sistema no que diz respeito a controle de tensão, corrente e torque. Mas, juntamente a tais vantagens, o sistema apresenta características indesejáveis, tais como a geração de sobretensão nos terminais do motor e a circulação de correntes de modo comum. A intensidade do estresse aplicado aos terminais do motor é agravada devido à alta frequência de chaveamento, os altos dv/dts que ocorrem a cada instante de chaveamento e ao comportamento de linha de transmissão, que é atribuído ao cabo diante dos pulsos de tensão de saída do inversor. Como conseqüências desses fenômenos, pode-se citar: falhas no isolamento do motor, diminuição do seu tempo de vida útil, circulação de correntes através das capacitâncias intrínsecas ao sistema e o condutor de terra, problemas de interferência eletromagnética, dentre outras.

Tais características de operação e problemas associados vêm sendo estudados há aproximadamente duas décadas, resultando em um amplo conjunto de métodos viáveis para a sua solução. Propostas que buscam mitigar os fenômenos de modo diferencial (presente entre as fases) e comum (presentes entre a fase e o terra) resultaram em diversas topologias

com aplicações específicas a cada sistema. Dentre os vários métodos propostos, pôde-se encontrar técnicas que atuam em ambos os fenômenos de forma conjunta, utilizando-se de componentes passivos, constituindo uma metodologia largamente utilizada em aplicações industriais.

Dentre as várias propostas existentes na literatura para a atenuação da sobretensão, o filtro RLC na saída do inversor se mostrou simples e bastante eficaz. Para que seja também efetivo na eliminação da circulação das correntes de modo comum, buscou-se um ponto comum entre as causas destes problemas, com o intuito de atenuá-las de forma conjunta com o problema de sobretensão. Esta topologia atua sob a filosofia de aumentar o tempo de subida do pulso de tensão de saída do inversor, que também é uma das principais causas da circulação de correntes de modo comum. Desta forma, foram desenvolvidas algumas metodologias para a atenuação de correntes de modo comum que partiram de topologias já existentes de filtros dv/dt , incluindo-se modificações apropriadas.

Estando estabelecido o cenário envolvendo o sistema de acionamento tornou-se imprescindível a busca de modelos computacionais capazes de retratar de forma precisa e eficiente o comportamento dinâmico do sistema. Vários estudos têm sido realizados com o objetivo de obter uma melhor representação do sistema para que os problemas de sobretensão e de circulação de correntes de modo comum pudessem ser analisados, bem como as possíveis soluções. Tais modelos constituem importante ferramenta para o entendimento, análise e avaliação de soluções.

Os programas comerciais do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) são mais adequados para simulações de respostas no domínio do tempo de sistemas elétricos.

Para a implementação do modelo desenvolvido neste trabalho optou-se pelo programa especializado em cálculo de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC[©] (*Power Systems CAD*) devido à praticidade de manipulação, disponibilidade em ambiente acadêmico e referências obtidas em trabalhos desenvolvidos anteriormente. O PSCAD permite a utilização do programa de simulação EMTDC através de uma interface gráfica de prática aplicação. A representação do cabo, que é um fator crítico neste estudo, a parâmetros distribuídos e dependentes com a frequência, é possível através de modelos presentes em uma biblioteca pré-programada.

Desta forma, o desenvolvimento do modelo de simulação que represente o sistema com todos os elementos envolvidos nos fenômenos estudados, de forma precisa e eficiente, torna-se imprescindível para o estudo de técnicas para mitigação, juntamente com as análises gerais das metodologias envolvidas no projeto de soluções. A praticidade alcançada pela implementação do modelo computacional no programa escolhido torna o processo de simulação bastante simples de ser utilizado, sem perder capacidade de fornecer resultados satisfatórios.

1.2 Contribuições

Uma das contribuições deste trabalho é apresentar o modelo de simulação desenvolvido utilizando o programa PSCAD/EMTDC[©], específico para cálculos de transitórios eletromagnéticos, que procurou reproduzir o comportamento dinâmico do sistema real com maior confiabilidade, incluindo a representação de todos os elementos presentes no sistema de acionamento que têm conexão direta aos fenômenos estudados, de maneira que as características apresentadas por uma determinada configuração do sistema pudessem ser

analisadas num único modelo. Assim, pode-se observar tanto fenômenos de sobretensão quanto correntes e tensão de modo comum através desta única representação.

Algumas topologias de filtros dv/dt que possuem técnicas passivas de filtragem para o modo comum foram analisadas, bem como características específicas levadas em consideração nas metodologias de projeto.

Assim sendo, uma segunda contribuição desta dissertação diz respeito à implementação de diferentes modelos de filtros dv/dt e modo comum na plataforma computacional desenvolvida, onde pôde-se analisar o desempenho de cada topologia na atenuação dos fenômenos estudados. Resultados experimentais foram obtidos para o sistema sem filtro e com filtro dv/dt , com o objetivo de validação do modelo de simulação e configurando-o como ferramenta confiável para análise do dimensionamento, estudo de desempenho e otimização de projetos de filtros.

1.3 Organização do Texto

O desenvolvimento do modelo de simulação e a análise de técnicas de mitigação envolvem o estudo detalhado dos fenômenos de modo diferencial e modo comum, do comportamento do sistema em altas frequências e demais características, até sua utilização para a comparação de topologias de filtros. Todo este processo encontra-se organizado da maneira apresentada a seguir.

Capítulo 2: Revisão da Literatura - Neste capítulo é feita uma revisão bibliográfica da literatura acerca das questões que envolvem todo o projeto do modelo de simulação. Este estudo inclui a análise detalhada dos fenômenos aqui tratados, incluindo características como sua geração, comportamento e técnicas de mitigação. No levantamento

de metodologias para a mitigação dos problemas de forma conjunta, foram ressaltadas questões importantes que apontam para a escolha das configurações implementadas na simulação. Há ainda um breve comentário sobre os programas de simulação mais utilizados para o estudo de transitórios eletromagnéticos junto às suas principais limitações, justificando a escolha do programa adotado.

Capítulo 3: Topologias de Filtros Passivos para a Redução da Sobretensão e das Correntes de Modo Comum - O capítulo contempla as características principais de algumas topologias de filtros dv/dt e de modo comum, detalhando questões inerentes à análise e critérios de dimensionamento. Este estudo forneceu, mesmo que de forma simplificada, uma fonte importante de informações para a escolha da topologia a ser utilizada conforme as necessidades específicas do sistema.

Capítulo 4: Modelo Computacional Proposto - Este capítulo apresenta o desenvolvimento detalhado da modelagem de um sistema de acionamento de motor de indução no programa PSCAD/EMTDC[©]. Cada componente presente no sistema de acionamento foi representado de forma a reproduzir seu comportamento em alta frequência de forma adequada. Foi possível, através deste modelo, analisar o comportamento dinâmico do sistema para dois comprimentos de cabos, fenômenos de sobretensão e correntes de modo comum e ainda estudar o desempenho de quatro diferentes topologias de filtro.

Capítulo 5: Resultados Experimentais - São apresentados os resultados experimentais que vêm validar o modelo computacional proposto. Os ensaios experimentais foram realizados para o sistema sem filtro e com filtro dv/dt , sendo que as topologias envolvendo técnicas de filtragem para modo comum são sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 6: Conclusões e Propostas de Continuidade - São apresentadas as conclusões acerca do trabalho realizado e as propostas de continuidade da pesquisa.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

Neste capítulo serão discutidos os fenômenos presentes no sistema inversor-cabo-motor, gerados pelos altos dv/dt 's e pelas altas frequências de chaveamento e agravados pelo comprimento longo do cabo que liga o inversor ao motor. As principais topologias de mitigação que atuam sobre os fatores preponderantes associados às sobretensões (modo diferencial) e circulação de correntes de modo comum (modo comum) também são analisadas.

Será feita uma revisão da literatura acerca destes problemas e destacados os itens mais diretamente relacionados com a topologia de filtro que foi foco deste estudo, sendo levantadas ainda questões sobre as melhores formas de análise computacional utilizadas para transitórios eletromagnéticos.

2.1 Sobretensões Transitórias nos Terminais dos Motores Elétricos

Conforme bem se conhece, a opção pelo uso de inversores no acionamento de máquinas elétricas apresenta características bastante vantajosas tais como a possibilidade de utilização de estratégias de controle como, V/f constante, técnicas de orientação de campo e controle direto de conjugado.

Com a utilização dos dispositivos semicondutores de potência, tais como o IGBT (*Insulate Gate Bipolar Transistor*), o sistema pôde agregar ainda mais melhorias, tais como

o rápido tempo de subida (dv/dt) de operação, reduzindo-se as perdas devido ao chaveamento e aumentando-se a eficiência do sistema. Mas, juntamente a essas qualidades, o sistema apresenta comportamentos indesejáveis relacionados à sua operação. A rápida mudança de tensão em relação ao tempo (dv/dt) e a alta frequência de chaveamento (f_s) causam oscilações transitórias de tensão nos terminais do motor (sobretensões) que podem chegar a valores superiores a três vezes a tensão do barramento de corrente contínua (conforme já relatado na literatura), causando estresse repetitivo e possibilidade de falha no isolamento entre espiras e isolamento entre enrolamentos do motor.

2.1.1 Análise das Sobretensões Transitórias

Sistemas de acionamento que possuem cabos de comprimentos longos que conectam o inversor ao motor, ou seja, onde o centro de controle se encontra a partir de 20 metros da planta a ser controlada (ou em alguns casos, como as plataformas de petróleo, tal distância alcança alguns km), apresentam alguns problemas aqui analisados.

Em tais sistemas, os cabos longos se comportam como linhas de transmissão para os pulsos de saída gerados pelo inversor. Através da teoria de propagação de ondas e das análises de reflexão, pode-se determinar o pico de tensão nos terminais do motor. Os pulsos de tensão de saída do inversor possuem amplitude igual ao valor da tensão no barramento de corrente contínua. A cada chaveamento do inversor, ocorrem sobretensões transitórias nos terminais do motor que acabam por danificar seu isolamento. As amplitudes dessas sobretensões transitórias podem chegar a mais de três vezes o valor da tensão do barramento de corrente contínua [7, 8].

Baseando-se no comportamento de uma onda em uma linha de transmissão, pode-se fazer uma análise das reflexões de tensão no cabo. Tais reflexões têm como condição

principal a diferença que existe entre a impedância de surto do cabo e a impedância do motor (impedância do motor \gg impedância do cabo), resultando em oscilações de tensão em seus terminais cuja frequência está relacionada ao tempo de viagem do pulso pelo cabo [9]. Esta análise pode ser simplificada feita segundo a seguinte dinâmica: quando o pulso sai do inversor e atinge a extremidade de ligação do cabo com o motor, período considerado como um tempo de viagem, a variação de impedâncias entre os dois resulta em coeficiente de reflexão próximo da unidade. A onda refletida cresce com a mesma taxa da onda incidente, mas em direção ao inversor, e com valor positivo. Assim, a onda refletida juntamente com a onda incidente, fazem com que o valor da tensão seja o dobro nos terminais do motor. A onda refletida propaga-se em direção ao inversor, onde sofre uma nova reflexão, e, após dois tempos de viagem, retorna ao motor com valor negativo [10]. Além disso, em sistema com cabos muito extensos, onde tem-se problemas de ondas estacionárias, a forma de onda da tensão de saída do inversor pode conter harmônicos significantes e transitórios que podem interferir nas características de desempenho do motor e no seu tempo de vida útil [11].

Efeito do tempo de subida do pulso e dv/dt

O efeito do tempo de subida do pulso de tensão (t_s) de saída do inversor também deve ser considerado neste estudo. O tempo de subida é definido como o tempo que a tensão leva para ir de 10% a 90% do seu valor em regime permanente. O tempo de subida do pulso de tensão está diretamente relacionado ao comprimento crítico (ℓ_c) do cabo da seguinte maneira [10]:

$$\ell_c = \frac{t_s \cdot v}{2} \quad (2.1)$$

Onde ν é a velocidade de propagação do pulso pelo cabo.

Esta relação foi obtida igualando-se o tempo de subida do pulso a duas vezes o tempo de viagem (t_v) deste pelo cabo, condição em que já se observa uma reflexão plena (dobro da tensão para coeficiente de reflexão unitário). O comprimento crítico do cabo, (ℓ_c), é definido como o comprimento mínimo necessário para que uma reflexão plena ocorra. Nota-se que, com os pequenos tempos de subida impostos pelos IGBTs, a ocorrência de sobretensões acontece para comprimentos de cabos cada vez menores.

Não somente as amplitudes das sobretensões são preocupantes, mas também a taxa de repetição com que acontecem, devido às altas frequências de chaveamento dos dispositivos semicondutores do inversor. O aumento na frequência de chaveamento acarreta, portanto, no conseqüente aumento do estresse no motor.

Distribuição da sobretensão nos enrolamentos do motor

A distribuição de tensão dos pulsos e sobretensões resultantes não seguem um perfil uniforme nos enrolamentos do motor, de modo que as primeiras espiras ficam sujeitas a maiores variações de tensão. Os enrolamentos mais internos, embora não se desgastem no mesmo tempo que os de entrada, ainda apresentam valores elevados de tensão e sofrem danos igualmente preocupantes. Em motores de baixa tensão, os enrolamentos geralmente são feitos de maneira aleatória, de forma que pode acontecer de a primeira e a última bobina estarem próximas uma da outra e a sobretensão, devido à grande diferença de potencial criada, possibilita o surgimento de descargas parciais, o que reduz o tempo de vida útil da isolação do motor [5]. Mais uma vez, pode-se concluir que curtos tempos de subida e cabos longos tornam essa situação ainda pior.

2.1.2 Discussão de Propostas de Minimização de Sobretensões

As topologias aqui analisadas para a minimização dos fenômenos de sobretensão partem da configuração de filtros passivos, que têm como características principais serem filtros passivos de segunda ordem ligados aos terminais do inversor. Outros métodos serão discutidos e comparados para complementação da análise de técnicas de filtragem disponíveis.

Dentre as técnicas já desenvolvidas para a atenuação da sobretensão que buscam atuar sobre fatores que influenciam diretamente em seu aparecimento, pode-se citar:

- Tempo de subida do pulso: O objetivo da técnica que atua sobre este fator é aumentar o comprimento crítico do cabo que conecta o inversor ao motor;
- Casamento de impedâncias entre cabo e motor: Eliminar as reflexões de tensão;
- Harmônicos e Técnicas de chaveamento: Visam atuar diretamente na fonte do problema, com técnicas que visam minimizar o dv/dt , entre outros.

Filtros passivos para a redução da sobretensão são de implementação relativamente simples, eficientes na redução do dv/dt e apresentam boa relação custo/benefício. Existem diversas topologias de filtros passivos para a redução do dv/dt , geralmente acopladas à saída do inversor, que vão desde simples reatores a circuitos mais elaborados que se diferem em formas de conexão e metodologias de projeto. As metodologias para o dimensionamento de parâmetros diferem de acordo com cada sistema, de forma que, para se buscar a solução mais eficiente, são necessárias simulações para análises e comparações e, assim, determinação da técnica mais adequada.

Com o objetivo de se aumentar o tempo de subida do pulso, pode-se citar o filtro dv/dt , que possui, geralmente, uma configuração formada por elementos RLC (Fig. 2.3)

conectados na saída do inversor, embora existam topologias para redução do dv/dt que possuem configurações que envolvam apenas L (Fig. 2.1) ou LC (Fig. 2.2) [12, 6]. Essas topologias de filtro reduzem variações de tensão de modo diferencial e também de modo comum, reduzindo-se as sobretensões e circulação de correntes de modo comum. O aumento do tempo de subida do pulso tem conseqüente aumento no comprimento crítico do cabo. Dentre as metodologias de filtros para sobretensões, o filtro RLC foi o que apresentou resultados mais significativos para o modo comum [1, 3].

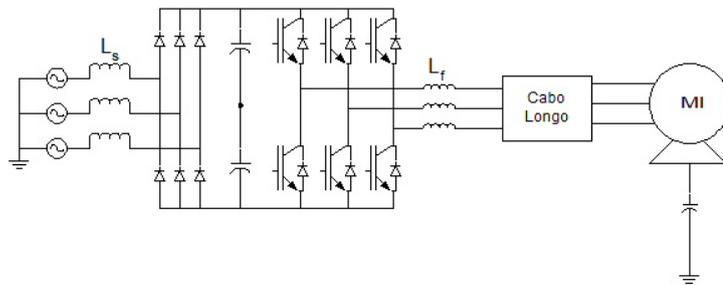


Figura 2.1: Reator acoplado na saída do inversor - Objetivo: Aumento do tempo de subida do pulso de tensão

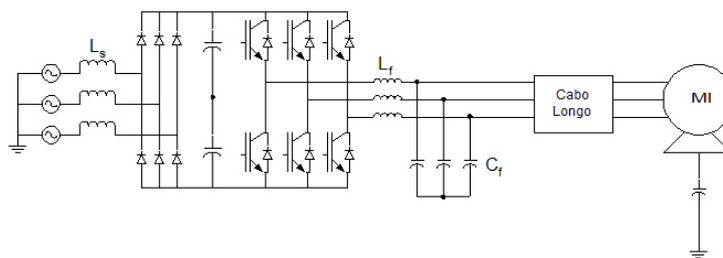


Figura 2.2: Filtro LC acoplado na saída do inversor - Objetivo: Aumento do tempo de subida do pulso de tensão

O casamento entre as impedâncias características do cabo e do motor foi também alvo de outros estudos. Com este objetivo pode-se citar filtros passivos (R, RC (Fig. 2.4) ou

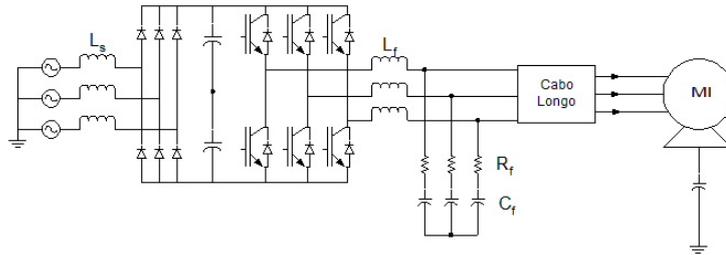


Figura 2.3: Filtro RLC acoplado na saída do inversor - Objetivo: Aumento do tempo de subida do pulso de tensão

RLC (Fig. 2.5)), nos terminais do motor, cuja impedância característica se iguale à do cabo, tornando o coeficiente de reflexão igual a zero. A modelagem e dimensionamento devem levar em consideração critérios como igualar o valor da resistência ao da impedância característica do cabo na frequência específica e análise de perdas para escolha do capacitor [1]. O filtro mais comumente usado neste caso é o RC. Embora pareça, em primeira análise, uma boa alternativa, a aplicação deste filtro tem algumas limitações, como difícil acessibilidade aos terminais do motor para sua instalação, perdas elevadas e, comparado ao filtro na saída do inversor, não apresenta redução no modo comum e, desta forma, sem efeito na tensão de eixo e correntes de rolamento [13].

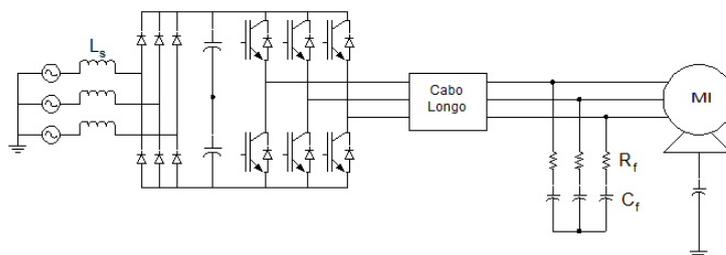


Figura 2.4: Filtro RC acoplado na entrada do motor - Objetivo: Promover o casamento de impedâncias entre cabo e motor

O filtro senoidal tem como objetivo a filtragem das componentes harmônicas da tensão de saída do inversor. Esta medida tem como consequência um acentuado aumento no

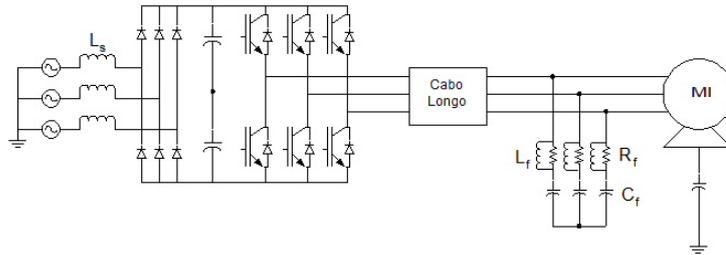


Figura 2.5: Filtro RLC acoplado na entrada do motor - Objetivo: Promover o casamento de impedâncias entre cabo e motor

comprimento crítico do cabo. Essa topologia apresenta bons resultados na mitigação da sobretensão. Algumas limitações são o custo elevado e as grandes proporções físicas [14].

Quando a preocupação com perdas passa a ser alvo principal na questão da eliminação de sobretensões, pode-se optar por outras medidas que atuam diretamente no inversor, como a implementação de outras técnicas de modulação. A mudança da frequência tem aplicação em sistemas com cabos muito longos [15]. Essa medida tem como objetivo fazer com que os harmônicos de chaveamento não excitem as ressonâncias naturais do cabo. Operações com chaveamento suave diminuem o tempo de subida do pulso, mas apresentam resultados inferiores aos dos filtros no que diz respeito à sobretensões transitórias [16]. A técnica de multiníveis diminui os transitórios de chaveamento, mas no caso da diminuição da sobretensão deve-se alterar a tensão de saída tornando o sistema de difícil controle e com custo elevado.

2.2 Circulação de Correntes de Modo Comum

Uma das contribuições deste trabalho, conforme mencionado anteriormente, está no desenvolvimento de um sistema para simulação utilizando o programa PSCAD/EMTDC[©], que contemple ao mesmo tempo os fenômenos associados ao modo diferencial (sobretensões

terminais) e aqueles que ocorrem no modo comum (tensão e correntes de modo comum). Portanto, faz-se necessária uma caracterização mais detalhada do modo comum, incluindo-se as diversas capacitâncias parasitas presentes no sistema e formas de aterramento do sistema para que se possa reproduzir de forma mais próxima o comportamento dinâmico do sistema real e as características da configuração da planta analisada.

2.2.1 Interferência Eletromagnética Conduzida

Para a configuração do sistema em questão (inversor - cabo longo - motor), sabe-se que transitórios repentinos de tensão (dv/dt) são associados a curtos tempos de chaveamento dos dispositivos semicondutores. A geração atual de acionamentos de velocidade variável utiliza semicondutores IGBT's que apresentam tempos de subida da ordem de uma centena de nano segundos, e são fontes inerentes de interferência eletromagnética conduzida e irradiada [17]. O interesse deste estudo são fenômenos conduzidos, sendo então o foco das discussões apresentadas.

Ao se falar em interferência conduzida, costuma-se classificá-la em dois tipos, o diferencial e o comum. O modo diferencial está presente entre fases e o modo comum está presente entre as fases e a terra. As altas taxas de variação de tensão causadas pela rápida velocidade de operação de chaveamento produzem correntes oscilatórias de alta frequência de modo diferencial e de modo comum devido aos acoplamentos capacitivos inevitavelmente presentes em um sistema de acionamento [18]. Tais correntes estão presentes em todos os elementos do sistema. Os fenômenos de modo diferencial, relacionados às sobretensões transitórias foram analisados na seção anterior, enquanto os fenômenos de modo comum são agora estudados de forma mais detalhada.

2.2.2 Tensão de Modo Comum em Sistemas Inversor - Cabo - Motor

Acionamentos com técnica de modulação por largura de pulso que utilizam dispositivos semicondutores IGBT geram naturalmente uma tensão de modo comum (V_{MC}) entre as fases e a terra durante sua operação. A soma instantânea das tensões das três fases em relação à terra é diferente de zero (tensão de modo comum). Pode-se, inclusive, afirmar que a composição dos pulsos de tensão resulta em tensão do neutro para a terra cuja forma de onda é formada por degraus equivalentes a $\frac{1}{3} V_{cc}$ (Onde V_{cc} é a tensão do barramento de corrente contínua) [10]. Essa tensão induz a circulação de correntes de modo comum pela rede de aterramento ao excitar os acoplamentos capacitivos presentes entre elementos do sistema e a terra gerando danos ao sistema e problemas de interferência eletromagnética.

Cálculo da Tensão de Modo Comum

Conforme ilustrado pela Fig. 2.6, a tensão de neutro do motor (V_n) corresponde à tensão de modo comum com oscilações transitórias a cada dv/dt . Segue-se o cálculo da tensão de modo comum de maneira simplificada para visualização geral do problema na Eq: 2.6, [19]:

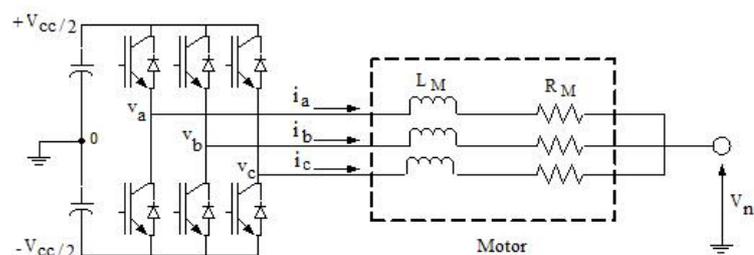


Figura 2.6: Sistema Inversor - Motor, simplificado para visualização de cálculo da tensão de modo comum

$$v_a - V_n = R_M i_a + L_M \frac{di_a}{dt} \quad (2.2)$$

$$v_b - V_n = R_M i_b + L_M \frac{di_b}{dt} \quad (2.3)$$

$$v_c - V_n = R_M i_c + L_M \frac{di_c}{dt} \quad (2.4)$$

$$(2.5)$$

A tensão de modo comum no motor é calculada por:

$$V_n = \frac{v_a + v_b + v_c}{3} \quad (2.6)$$

A tensão de modo comum muda de $V_{cc}/3$ a cada chaveamento do inversor. A tensão de modo comum produzida no motor promove a circulação de uma corrente (corrente de modo comum) que flui através de capacitâncias parasitas entre os enrolamentos do motor e carcaça. A corrente de dispersão flui da carcaça do motor através do condutor de terra. Assim, as correntes de modo comum circulam no sistema devido ao circuito elétrico criado por acoplamentos capacitivos existentes no inversor, no cabo e no motor (acoplamentos entre estator e terra e entre eixo e carcaça aterrada), causando interferências e danos, como, por exemplo, diminuição no tempo de vida dos rolamentos e mancais. Tais acoplamentos se comportam como caminhos de impedância baixa nas altas frequências dos pulsos de tensão.

Os inversores PWM chaveiam a tensão do barramento de corrente contínua (V_{cc}) nos terminais do motor de forma que a tensão terminal deve ser $+V_{cc}$ ou $-V_{cc}$, de forma que não é possível que a soma instantânea das três tensões nos terminais seja zero. O valor

médio de tensões aplicadas ao motor em um ciclo é mantida zero, mas a soma instantânea das tensões nos terminais do motor é diferente de zero.

Vários danos e operação indevida de componentes do sistema estão relacionados direta e/ou indiretamente ao modo comum. Conforme dito, danos nos rolamentos do motor, e também, aquecimento excessivo de partes do sistema e interferências eletromagnéticas em equipamentos do sistema ou na vizinhança deste são exemplos clássicos de problemas associados à presença das correntes de modo comum no sistema.

2.2.3 Circulação das Correntes de Modo Diferencial e de Modo Comum

Conforme dito anteriormente as rápidas variações de tensão (dv/dt) que se relacionam aos pulsos PWM, curtos tempos de subida e altas frequências de chaveamento geram interferências conduzidas. Tais interferências aparecem na forma de correntes de frequência elevada presentes em todo o sistema, seja entre fases (dv/dt de modo diferencial) ou entre fases e a terra (dv/dt de modo comum).

A corrente de modo comum é uma corrente oscilatória de alta frequência que flui através de acoplamentos capacitivos presentes em todos os componentes do sistema e a terra. Já a corrente de modo diferencial é uma corrente oscilatória de alta frequência que flui através dos acoplamentos capacitivos presentes entre as fases [18].

Os acoplamentos capacitivos pelos quais há circulação de correntes de modo comum no sistema são vários. As capacitâncias mais relevantes nesta análise são [6]:

- Capacitância fase-terra em cada fase do cabo.
- Capacitância parasita do enrolamento do estator para a terra.

- Capacitância coletor-dissipador na montagem física dos IGBTs nos inversores.

Os altos dv/dt 's de chaveamento produzidos pelos inversores aumentam o pico de corrente de modo comum ($i=C*dv/dt$). A alta frequência da portadora aumenta o número de transições e a soma total de corrente para a terra. As altas frequências de oscilação das ondas de tensão de modo comum também aparecem nos terminais do motor e criam correntes de dispersão para a terra através dos enrolamentos do estator do motor e a terra, e do eixo (tensão de eixo) para a carçaca e terra através dos rolamentos do motor (correntes de rolamento).

Tomando como foco as interferências eletromagnéticas irradiadas provenientes das correntes de modo diferencial e modo comum, faz-se a seguinte análise: as correntes de modo diferencial são iguais em magnitude e circulam com direções opostas em dois condutores; as correntes de modo comum são iguais em magnitude e possuem a mesma direção. Os campos irradiados por cada corrente são somados para fornecer o campo total irradiado. Os campos criados pelas correntes de modo diferencial se subtraem, embora não se cancelem. Todavia, o campo resultante é pequeno. Já as correntes de modo comum criam um campo que dá uma maior contribuição no campo total. Uma pequena corrente de modo comum pode produzir o mesmo nível de campo elétrico radiado que altas correntes de modo diferencial. Resumindo, correntes de modo comum têm maior potencial para produzir emissões irradiadas do que correntes de modo diferencial [20].

Tais correntes são prejudiciais à eficiente operação do sistema e um importante aspecto do análise das interferências eletromagnéticas presentes no sistema. Através da precisa análise e representação das correntes de modo comum poder-se-á buscar soluções de minimização e/ou mitigação através do sistema de simulação computacional com maior

confiabilidade.

2.2.4 Tensão de Eixo e Correntes de Rolamento

Historicamente, as análises de tensão de eixo e correntes de rolamento consideravam o sistema sob operação senoidal, a 50 Hz ou 60Hz, levando em conta apenas as frequências muito baixas e harmônicos ímpares mais próximos e consideravam as causas para seu aparecimento como predominantemente fenômenos eletromagneticamente induzidos. Todavia, sob a operação de modulação por largura de pulso (PWM), tem-se que esses mesmos fenômenos são predominantemente de natureza eletrostática [21, 22, 23].

As correntes de rolamento que circulam sob operação senoidal aparecem devido a assimetrias no circuito do rotor e à irregularidade do campo magnético no entreferro inerente à construção da máquina, além de serem de baixa frequência, passam por impedâncias altas que as limitam a valores baixos, não havendo comprometimento considerável da vida útil da máquina [6].

Portanto, as correntes de rolamento não são novidade. Geralmente, falhas nos rolamentos podem ser causadas por vibração mecânica, sobrecarga térmica, ou condução de correntes elétricas. Falhas eletricamente induzidas eram centradas historicamente em correntes de rolamento causadas por assimetrias magnéticas na construção do motor; assimetrias magnéticas induzem tensão no eixo do motor, resultando em uma corrente de rolamento circulatória. Essa corrente era controlada isolando-se o terminal não acionado do eixo do motor. Com o uso da alta frequência de chaveamento em sistemas com modulação por largura de pulso, no entanto, os problemas nos rolamentos acontecem em escala maior que no passado, visto que essas correntes começaram a circular por partes antes consideradas isolantes.

A tensão de modo comum gerada pelo inversor cria uma diferença de potencial no acoplamento eletrostático existente entre estator e rotor, criando uma tensão no eixo (Tensão de Eixo - tensão entre o rotor e a carcaça aterrada ou mesmo um ponto de terra qualquer) (Fig. 2.7). Este acoplamento vai acumulando carga elétrica até que seu campo elétrico ultrapasse o valor suportável pelo dielétrico do filme de óleo lubrificante do rolamento, e que apresenta baixa impedância a altas frequências, e produz uma descarga elétrica (como um impulso) extremamente prejudicial por causar um estriamento da pista do rolamento. Esta descarga é chamada de corrente de rolamento (EDM \rightarrow Electrical Discharge Machining) e ocorre se o motor estiver aterrado, para que possa haver circulação de corrente para a terra.

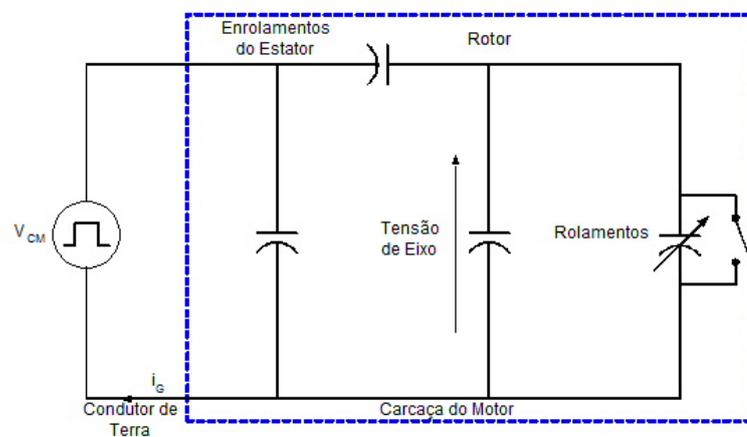


Figura 2.7: Tensão de Eixo e Correntes de Rolamento

A presença deste tipo de corrente nos motores é indesejável visto que diminui o tempo de vida dos rolamentos e, portanto, gera custos com parada de operação. Como consequências principais da circulação de tais correntes, pode-se citar [6]:

- Aumento da corrente parasita total na máquina;
- Comprometimento da mobilidade do eixo da máquina, devido à deterioração do óleo

lubrificante do rolamento;

- Aquecimento excessivo da máquina;
- Estriamento da pista do rolamento a cada descarga de corrente;

2.2.5 Métodos e Técnicas para Minimização do Modo Comum em Sistemas de Acionamentos

Dentre técnicas e métodos publicados para a atenuação do modo comum, encontra-se sugestões de mudanças na instalação ou medidas tais como rolamentos isolados, aterramento do eixo, utilização de blindagem eletrostática, dentre outras [8, 13, 24]. Pesquisas mostram que operações com topologias de chaveamento suave não apresentam nenhuma vantagem no que se relaciona a correntes de rolamento e tensão de eixo [25]. Há técnicas que se utilizam de filtro para atenuação das correntes de modo comum.

Uma análise dos potenciais caminhos percorridos pelas correntes de rolamento dentro do motor e através do sistema foi desenvolvido para a busca de opções de atenuação. Há sugestões de diversas técnicas de mitigação das correntes, dentre elas [26]:

- Melhorar as conexões de aterramento de alta frequência entre motor e inversor e entre motor e carga.
- Isolar o rolamento do lado oposto ao acionado ou mesmo os dois rolamentos.
- Aterramento do eixo do motor.
- Isolar acoplamento entre motor e carga.
- Blindar o motor (ESIM - Electrostatic Shielded Induction Motor)[27].

Com relação às soluções citadas o que se pode afirmar é que a opção por alguma delas deve ser feita considerando-se suas limitações. Por exemplo, ao se isolar os rolamentos pode-se favorecer à ocorrência de descargas mais intensas por outros caminhos; o aterramento do eixo do motor requer manutenções periódicas e a blindagem do motor é pouco prática pois requer máquinas especiais, o que torna o custo elevado desta técnica.

Além das medidas referentes à instalação e ao motor, existem métodos de alterações na topologia do inversor bem como em técnicas de modulação. Uma topologia que adiciona uma ponte dual com quatro chaves ao inversor, controlada de forma complementar à original, tem o objetivo de eliminar a tensão de modo comum gerada [28]. Mudanças na modulação também foram sugeridas e por vezes comparadas para eliminação da tensão de modo comum [29, 30]. São métodos eficazes, porém de difícil implementação em sistemas já implantados na indústria.

Como o objetivo de desenvolvimento da plataforma de simulação feito neste trabalho é criar um modelo que permita a análise e otimização do projeto de filtros dv/dt e modo comum, maior atenção foi dada a topologias que envolvem essa característica. Dentre as quais, a abordagem de metodologias de projetos de modelos de filtros dv/dt e modo comum foram citados e comparados, sendo que alguns deles foram implementados no modelo de simulação, conforme será visto em capítulos posteriores.

Cabe aqui, entretanto, fazer um breve levantamento dessas técnicas. Algumas abordagens empregam indutores de modo comum por ser uma forma simples e barata, transformador de modo comum (que é basicamente um indutor de modo comum com um enrolamento adicional geralmente conectado a um resistor e ligado ou não ao barramento de corrente contínua) e circuitos envolvendo componentes ativos [31, 32].

Para melhor ilustrar a atuação do indutor de modo comum, será feita a análise da

circulação de correntes em dois condutores paralelos, conforme mostrado na Fig 2.8. Considerando que esse par de condutores esteja conduzindo correntes I_1 e I_2 , pode-se decompor essas duas correntes em duas correntes auxiliares: correntes de modo diferencial, I_D , e do modo comum, I_C [20].

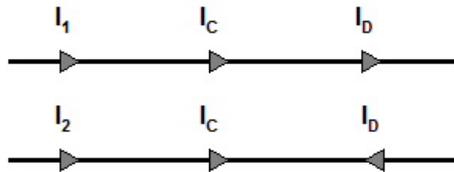


Figura 2.8: Correntes de modo comum e de modo diferencial em um par de condutores

As correntes de modo diferencial são iguais em magnitude, mas com direções opostas nos dois condutores; já as correntes de modo comum são iguais em magnitude e possuem a mesma direção. Um dos métodos mais utilizados para reduzir as correntes de modo comum são os indutores de modo comum, onde um par de condutores carregado de correntes I_1 e I_2 são enrolados em um núcleo ferromagnético. Assume-se que os enrolamentos são idênticos, tal que $L_1 = L_2 = L$. No indutor de modo comum as indutâncias mútua e própria são iguais. Para se investigar o efeito do núcleo em bloquear a corrente de modo comum, calcula-se a impedância de um enrolamento:

$$Z_1 = \frac{j\omega L_1 + j\omega L_2}{I_1} = \frac{pL I_1 + pM I_2}{I_1} \quad (2.7)$$

onde $p = j\omega$

$$Z_{CM} = p(L + M) \quad (2.8)$$

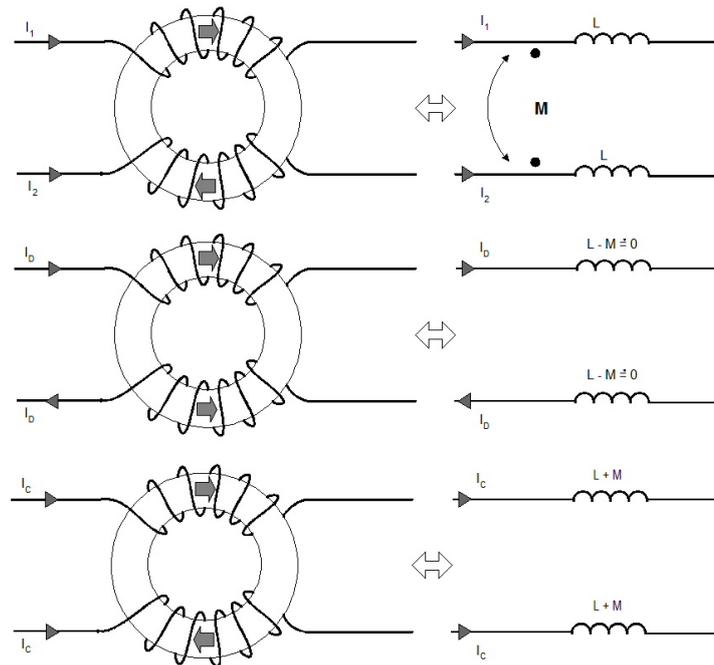


Figura 2.9: Efeito do indutor de modo comum nas correntes de modo diferencial e modo comum

$$Z_{DM} = p(L - M) \quad (2.9)$$

A escolha de determinados materiais, como a ferrite, na construção do núcleo, cria uma resistência dependente da frequência também em série com a corrente de modo comum, que torna-se alta em altas frequências. Desta forma, as correntes de modo comum não somente são bloqueadas mas também têm sua energia dissipada na resistência. Para o efetivo bloqueio das correntes de modo comum, os condutores devem ser enrolados no núcleo de maneira que os fluxos devido às correntes de modo comum se somem e os fluxos devido às correntes de modo diferencial se subtraíam no núcleo. Deve haver separação dos condutores que entram no núcleo daqueles que saem do mesmo para evitar a existência de capacitâncias parasitas entre entrada e saída que podem reduzir o desempenho do indutor [20].

O indutor de modo comum aumenta a impedância vista pelas fontes de modo comum. Entretanto, sozinho, o indutor de modo comum não elimina as tensões de eixo, mas reduz de forma considerável as correntes entre estator e terra e, então, a componente da corrente de rolamento provocada por ela. Associados aos filtros dv/dt , os indutores de modo comum mostram-se eficientes na redução dos valores de pico das correntes de modo comum e diminuição das oscilações da tensão de modo comum.

Os filtros passivos conectados ao barramento de corrente contínua têm sido mais aplicados quando se deseja controlar e minimizar o modo comum. O filtro passivo de segunda ordem, por si só, apresenta bons resultados para o modo comum, conforme mencionado, mas não de forma conclusiva. Foram desenvolvidas topologias que partiram do modelo de filtro dv/dt que pudessem também minimizar o modo comum. Alguns modelos sugerem a obtenção de melhores resultados na redução do modo comum ao se conectar o ponto de neutro do filtro ao barramento de corrente contínua como forma de desviar o modo comum de volta ao inversor, conforme será mostrado em capítulos posteriores [2, 3, 14, 33, 34, 35].

Formas de aterramento e tipos de cabos para redução do modo comum

Dentre as causas que são apontadas como principais para a circulação das correntes de modo comum, já foram citados a alta taxa de variação da tensão com o tempo (dv/dt), a frequência de chaveamento e o tipo de modulação utilizada. Porém, estudos voltados à circulação das correntes de modo comum que sugerem modificações nas formas de aterramento e a adoção de cabos considerados mais apropriados a aplicações em sistemas de acionamento (Anexo A). A filosofia de tais propostas é estabelecer "caminhos" com maior probabilidade de circulação de correntes de modo comum no sistema, dependendo do tipo de instalação adotado.

Um exemplo importante resultante de tais estudos detalha a circulação das correntes de modo comum nas redes de aterramento e analisa os tipos de aterramento e seu comportamento diante dos fenômenos de alta frequência apresentados pelos sistemas de acionamento [36]. É importante ressaltar também que diferentes potenciais podem ser criados em diferentes regiões da rede de aterramento conforme o tipo de instalação adotado.

Como exemplo, analisa-se um sistema de acionamento com cabos não blindados, distribuídos aleatoriamente. Pode-se ver na Fig. 2.10 a circulação das correntes de modo comum pelos principais acoplamentos capacitivos do sistema e sua presença na rede de aterramento.

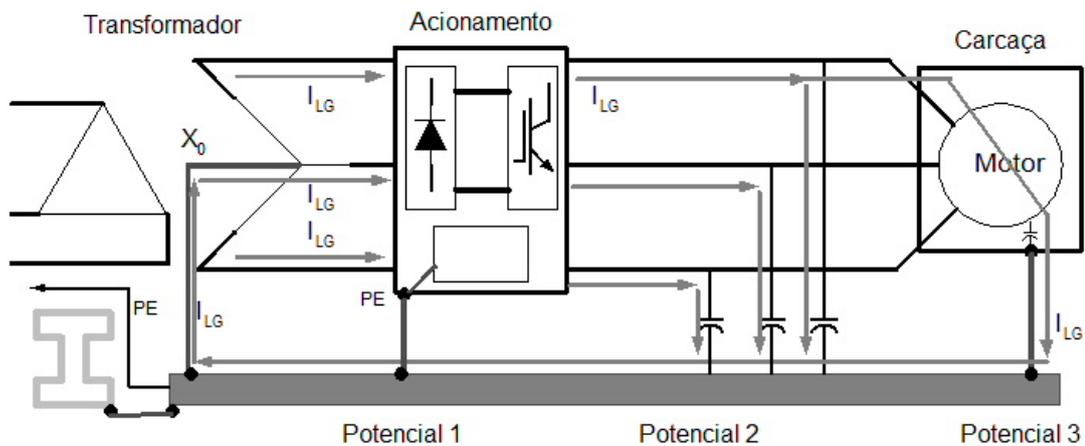


Figura 2.10: Circulação do modo comum em sistema com cabos não blindados distribuídos aleatoriamente e aterramento comum.

Portanto, técnicas que contribuam para a eliminação das correntes de modo comum atuando-se em medidas para instalação tornam-se interessantes para prevenção de danos a equipamentos adjacentes.

Medidas referentes à escolha do tipo de cabo a ser adotado também se configuram como forma eficiente de controle dos caminhos tomados pelas correntes de modo comum,

através da blindagem. A blindagem oferece um caminho de retorno para as correntes de modo comum de forma que a interferência não é reintroduzida para a rede de aterramento, desde que aterrada corretamente. O revestimento de PVC garante ainda que a maior parte da corrente de modo comum retorne de volta ao acionamento pela blindagem e fora de contatos acidentais com a rede de aterramento. O cabo ideal deve ter uma impedância de surto de modo comum, tanto em baixa como em alta frequência, que seja menor que a impedância típica da rede de aterramento do sistema (Anexo A) [36].

2.3 Métodos Computacionais de Análise

A análise computacional dos fenômenos supracitados tem extrema importância para estudos detalhados de seu comportamento bem como na busca por técnicas adequadas de solução. A representação do sistema capaz de reproduzir de forma precisa e eficiente seu comportamento dinâmico, tornou-se fundamental, sobretudo ao considerar estes modelos como sendo a principal ferramenta para o dimensionamento, estudo de desempenho, busca e/ou otimização de projeto dos filtros para atenuação da sobretensão e das correntes de modo comum. A representação do comportamento dos componentes do sistema de acionamento em altas frequências constitui condição crucial para a correta modelagem computacional. Para o sistema inversor - cabo - motor, é fundamental que o cabo e motor sejam representados de maneira precisa, visto que frente às altas frequências de chaveamento, o cabo se comporta como uma linha de transmissão para os pulsos de tensão e há uma grande diferença entre as impedâncias do cabo e do motor e ainda a presença de capacitâncias no sistema que, em altas frequências, se comportam como caminhos de baixa impedância, resultando na circulação de correntes de dispersão. O modelo utilizado

para representação do motor de indução em altas frequências constitui-se de resistências, indutâncias e capacitâncias, conforme detalhado posteriormente, de forma que há relativa facilidade para sua implementação computacional [12]. A modelagem do cabo pode ser feita a parâmetros concentrados ou distribuídos, o que, de certa forma, determina a escolha de programas específicos para o estudo de transitórios eletromagnéticos bem como define, de certa forma, a precisão dos resultados obtidos na simulação, bem como o esforço computacional envolvido.

Programas para simulação difundidos no meio acadêmico, como o Matlab, apresentam modelos para os diversos componentes do sistema. Entretanto os modelos disponíveis para o cabo não constituem representações apropriadas para os fenômenos em análise. Existe, entretanto, liberdade para se construir e inserir modelos a parâmetros concentrados com um número adequado de segmentos a fim de alcançar resultados satisfatórios. Apesar de ser bastante eficiente, a representação em parâmetros concentrados não retrata com precisão a dependência com a frequência, efeito pelicular entre outras características. A utilização de comprimentos extremamente pequenos dos segmentos do cabo pode se tornar proibitiva do ponto de vista computacional.

Programas do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*), disponibilizados comercialmente, geralmente apresentam modelos em suas bibliotecas para cabos tanto no domínio dos modos quanto no domínio das fases. Representações no domínio dos modos ou no domínio das fases foram implementados e consolidados, apresentando-se ideais no estudo dos fenômenos de modo diferencial e modo comum [37, 10, 5, 38]

Dentre os programas de análise de transitórios eletromagnéticos de sistemas elétricos, o PSCAD/EMTDC[©] se mostra adequado quando há necessidade de se realizar simulações no domínio do tempo. É de simples utilização por possuir uma interface gráfica bastante

amigável que permite a construção esquemática do circuito, processar simulações, analisar os resultados e administrar os dados em um ambiente integrado. Há modelos para linhas de transmissão e cabos no domínio dos modos e no domínio das fases disponíveis em sua biblioteca. Alguns modelos possuem características como representação em parâmetros distribuídos e dependentes da frequência. O desenvolvimento do modelo de simulação do sistema inversor - cabo - motor no programa PSCAD/EMTDC[©] permitiu a inclusão de características do pulso de tensão, onde a modulação por largura de pulso foi implementada de forma a permitir que, em futuros trabalhos, sejam implementadas outras formas de modulação (o que constitui uma novidade diante da literatura técnica pesquisada), cabos, impedância de entrada do motor e capacitâncias parasitas, além da implementação de topologias de filtros dv/dt e modo comum em análise de forma conjunta.

Devido a estas características e ainda disponibilidade no ambiente acadêmico e conhecimento adquirido em sua utilização em trabalhos anteriores [5, 38], o PSCAD foi escolhido para o desenvolvimento do modelo de simulação desenvolvido neste trabalho. Foram incluídas as representações de todos os elementos inerentes ao sistema de acionamento, bem como a implementação de diferentes topologias de filtros passivos, a fim de constituir uma ferramenta prática de análise.

2.4 Conclusões

O objetivo deste capítulo foi introduzir detalhadamente os fenômenos estudados associados ao modo diferencial e ao modo comum, de maneira a contemplar características fundamentais para seu entendimento, tal como origem, aspectos associados, danos causados ao sistema e principais técnicas de mitigação.

Foram ressaltados os pontos fundamentais acerca de vantagens e desvantagens de soluções adotadas a fim de serem apontadas importantes questões quando da opção pelas metodologias implementadas no modelo de simulação.

Também comentou-se brevemente a respeito dos programas utilizados para simulação de transitórios eletromagnéticos, ressaltando suas limitações e justificando a escolha pelo programa PSCAD/EMTDC[©].

Capítulo 3

Topologias de Filtros Passivos para Sobretensão Transitória e Correntes de Modo Comum

Conforme visto anteriormente, acionamentos que utilizam inversores com dispositivos semicondutores do tipo IGBT, apresentam diversos efeitos indesejáveis, como sobretensões transitórias nos terminais de motores, correntes de modo comum, danos nos rolamentos do motor devido às correntes de rolamento, dentre outros. Dependendo da aplicação, a mitigação de alguns desses efeitos, ou mesmo de todos, pode ser necessária. A solução mais comum é a utilização de filtros, empregados em aplicações industriais. Filtros passivos são a alternativa mais comumente utilizada, visto que possuem vantagens sobre as demais em termos de custo/benefício para a redução do dv/dt nos terminais do inversor.

Metodologias que buscam a mitigação tanto das sobretensões quanto do modo comum de maneira conjunta foram estudadas neste trabalho, resultando em configurações de filtros passivos na saída do inversor (compostos de elementos RLC - aqui citado como filtro dv/dt - e modificações para a redução dos fenômenos de modo comum), geralmente preferidos em ambiente industrial, seja pela simplicidade de seu projeto, seja por características como tamanho e custo de seus componentes. Tal configuração constituiu a condição principal da pesquisa das topologias apresentadas no presente trabalho. Outras metodologias que utilizam filosofias diferentes ao se buscar melhorias focadas nos problemas de sobretensão

e modo comum, seja de forma conjunta ou separada, foram comparadas e citadas anteriormente quando se analisou a questão das sobretensões e das correntes de modo comum.

Pode-se fazer uma comparação entre as topologias mais comuns de filtros, ressaltando suas características principais e intensidade dos efeitos indesejáveis gerados pelos mesmos. Na tabela 3.1 é mostrada uma comparação de desempenho para os seguintes tipos de filtros [4]:

- Reator na saída do inversor;
- Filtro de Modo Comum (Indutor de modo comum em paralelo com capacitor);
- Filtro dv/dt (RLC);
- Filtro Senoidal (RLC);
- Filtro com conexão ao barramento de corrente contínua;

Tabela 3.1: Comparação entre Topologias de Filtros para Modo Diferencial e Modo Comum [4]

Comparação entre Filtros					
Efeitos Secundários	Reator	M. Comum	dv/dt	Senoidal	Conexão Barr.
Estresse Isolam. Motor	-	-	+	++	++
Estresse Rolamentos	-	-/+	-/+	+	++
Emissões Alt.Freq. Cabo	-	+	-	-	++
Corrente Dispersão	-	-	-	-	++

Legenda: -Não Efetivo, -Pouco Efetivo, +Efetivo, ++Muito Efetivo.

Percebe-se que o filtro com conexão ao barramento de corrente contínua tem melhor desempenho em todos os aspectos analisados, dentre as topologias consideradas. Porém, não pode-se tomar somente esta característica de comparação como principal condição

para escolha do filtro. Antes, deve-se estudar de forma mais aprofundada quais as reais necessidades do sistema em questão e qual a metodologia de projeto trará melhor benefício na redução dos fenômenos quando da implementação.

Geralmente, a comparação entre topologias de filtros é comumente feita considerando-se a relação entre potência dissipada e a forma da tensão nos terminais do motor. Porém, o cálculo da potência é feito de forma diferente para cada filtro e há falta de critérios para classificação do que seria uma tensão terminal desejada. Desta forma, deve-se estabelecer figuras de mérito de forma que a comparação entre as abordagens e os resultados conseguidos através delas possa ser feita com simplicidade e de forma segura. Neste trabalho são analisadas diferentes topologias de filtros dv/dt , onde as seguintes características são utilizadas como figuras de mérito para fim de comparação:

- Simplicidade de projeto associada a um mínimo de considerações;
- Minimização da circulação de correntes de modo comum;
- Minimização da sobretensão nos terminais do motor;

Com base nos parâmetros acima, será apresentada neste capítulo uma análise de projetos de topologias de filtro dv/dt em conjunto com técnicas de filtragem para o modo comum, enquanto no seguinte são implementadas algumas topologias baseadas naquelas estudadas para que se possa analisar a efetividade da minimização da sobretensão e das correntes de modo comum, apresentando-se os principais fatores comparativos segundo os critérios estabelecidos acima.

3.1 Filtro dv/dt

O filtro dv/dt opera segundo o seguinte princípio: aumentar o tempo de subida do pulso de tensão de saída do inversor de modo a filtrar as componentes de alta frequência responsáveis pelo aparecimento do efeito "linha de transmissão" no cabo. Ao ser integrado no sistema, pode-se notar claramente melhorias na distribuição de tensão nos enrolamentos do motor, visto que os elevados níveis de dv/dt são uma das principais causas de rompimento do isolamento. Análises experimentais mostraram tal fato e vieram reforçar a escolha desta topologia para que, em conjunto com os métodos de redução do modo comum, fossem desenvolvidas metodologias para a integração de ambos os projetos [5].

Serão apresentadas algumas das topologias de filtros dv/dt e de modo comum integrados, que seguem a configuração já citada e escolhida para aplicação, onde serão mostrados aspectos gerais e considerações de projeto e dimensionamento de seus parâmetros. O filtro dv/dt foi implementado no modelo de simulação juntamente a outras topologias para minimização do modo comum.

Os filtros estudados possuem as seguintes características em comum:

- Princípio de funcionamento: Filtrar os dv/dt 's de modo diferencial e modo comum do pulso de tensão de saída do inversor;
- Possuem somente componentes passivos (Resistor, Indutor e Capacitor);
- São instalados na saída do inversor;

Partindo-se desta condição foram estudadas diferentes topologias, condições de dimensionamento dos parâmetros, formas de instalação e conexões como, por exemplo, a ligação no ponto médio do barramento de corrente contínua ao neutro do filtro, ou outras

alternativas para acoplar o filtro ao barramento de corrente contínua.

Uma análise das características principais e eficácia na redução do modo comum foram feitas e algumas topologias, ou topologias baseadas naquelas estudadas, implementadas no modelo de simulação desenvolvido, sendo melhor detalhadas no capítulo seguinte. Outras questões de extrema importância, como a inserção de perdas e mesmo viabilidade de implementação, foram por vezes levadas em consideração na busca de modelos mais adequados e levantamento de observações acerca de vantagens e desvantagens de aplicação. A seguir serão mostradas metodologias de projetos de filtros começando do filtro RLC (filtro dv/dt) passando por topologias que incluem técnicas para redução do modo comum.

3.1.1 Critérios para Dimensionamento do Filtro dv/dt

Cabe agora fazer uma breve descrição das considerações básicas aplicadas na metodologia para projeto do filtro dv/dt (Fig. 3.1). O dimensionamento dos parâmetros do filtro é feito de forma exclusiva para cada sistema, não havendo fórmulas de cálculo generalizadas para este fim. Existem formas de analisar o sistema e determinar limites conforme suas características. Ao se mudar características - como comprimento do cabo, característica de chaveamento, entre outros - o cálculo dos parâmetros deve ser refeito. A metodologia para projeto aqui apresentada foi desenvolvida em trabalhos anteriores pelo LAI - UFMG [6, 5].

Existem metodologias que determinam um valor crítico para o tempo de subida de forma que não ocorram as sobretensões plenas, geralmente especificando que este tempo seja maior que três vezes o tempo de viagem do pulso pelo cabo [39]. Embora de certa maneira possa ser feita tal consideração, não há como generalizar um cálculo que é particular de cada acionamento.

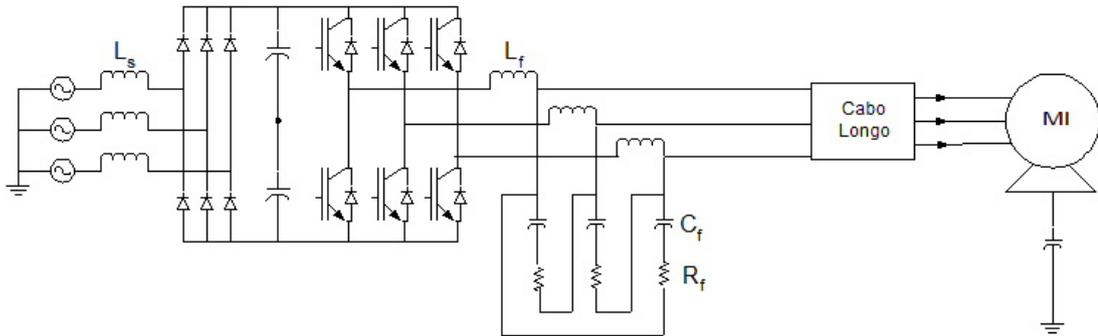


Figura 3.1: Filtro dv/dt

Uma forma simplificada de se estabelecer os parâmetros do filtro, que é bastante utilizada, é a de se determinar o tempo de subida do pulso a partir da resposta em frequência do sistema de segunda ordem dado pelo filtro. Então, estabelece-se uma frequência equivalente e uma relação de tempo de subida e sobretensão associada. Entretanto, a interação entre o cabo e o motor não pode ser desprezada por completo, ou seja, mesmo que se filtre as frequências que excitam o cabo de forma a ocasionar o efeito linha de transmissão, não há como desprezar o cabo e toda sua dinâmica eletromagnética. Devido à estas considerações, tal metodologia não pode ser considerada uma forma ideal de projeto de filtro por ser bastante simplista e não levar em consideração questões importantes.

Existem, também, outros fatores importantes a serem considerados nesta questão, como a constante de propagação e seus desmembramentos (as constantes de atenuação, α , e a de defasamento, β) para a obtenção de resultados mais apurados na análise da propagação do pulso de tensão pelo cabo. Desta forma se caracteriza por completo a onda de tensão que realmente chega aos terminais do motor. Tanto as distorções sofridas pela onda como a variação dos parâmetros com a frequência são fenômenos importantes para o desenvolvimento de projeto de filtros [6].

Feitas essas considerações partiu-se da análise em que se considera que todo o desenvolvimento está baseado em uma informação observada a partir de um procedimento simples: a sobretensão nos terminais do motor pode ser estimada a partir da função de transferência do filtro, sob determinadas condições.

Filtros na saída do inversor devem apresentar comportamento de um sistema super amortecido; portanto, devem ter um fator de amortecimento (ξ) maior que 1, não havendo oscilações na resposta ao pulso de tensão.

Para que não ocorram reflexões de tensão, a ideia é reduzir as dimensões elétricas do sistema, ou seja, o cabo deve ser eletricamente curto, de forma que seu comprimento físico deve ser menor que o comprimento de onda (λ). Portanto, a frequência de oscilação natural (ω_n) definida pela indutância e pela capacitância do filtro deve ser estabelecida sob esta característica.

Na metodologia desenvolvida em trabalhos anteriores do LAI foi adotado um valor de comprimento de onda 50 vezes maior que o comprimento do cabo. De forma que houvesse possibilidade de aplicação para uma maior variedade de comprimentos de cabo.

Pôde-se então, estabelecer o fator de amortecimento, segundo relações entre velocidade de propagação com o comprimento de onda adotado anteriormente e a velocidade de propagação, frequência de oscilação e fator de amortecimento. Determinado o fator de amortecimento (segundo o comprimento de onda estipulado), obtém-se, através de uma regressão para o fator de amortecimento após a medição dos parâmetros do cabo, uma relação entre fator de amortecimento em função da frequência de oscilação natural. E, portanto, determina-se o valor da frequência de oscilação natural.

Com a frequência de oscilação natural agora obtida, calcula-se os valores de L_f e C_f . Outras questões importantes como a análise de perdas também foi levada em consideração

quando do desenvolvimento desta metodologia de projeto de filtros.

Portanto, para a utilização da função de transferência, deve-se levar em consideração algumas condições [6]. Ao se simplificar a função de transferência do filtro, utiliza-se dois fatores para análise:

- Fator de amortecimento (ξ): Define relações entre os parâmetros do filtro e super-amortecimento.
- Frequência natural do filtro (ω_n): análise do comportamento do filtro em altas frequências.

Os parâmetros são então calculados, após estas considerações, da seguinte forma:

- Resistência: Igual ao valor da impedância característica do cabo quando a frequência tende ao infinito, pois em altas frequências o capacitor, C_f , se comporta como um curto circuito.
- Indutância: Deve ter o menor valor possível para eficiência e limitação de peso e custo.
- Capacitância: Deve-se levar em conta a relação de compromisso entre aumento e diminuição da capacitância para redução da sobretensão e redução de perdas, respectivamente.

Conforme mencionado anteriormente, houve uma redução no valor de pico das correntes de modo comum ao se utilizar filtros dv/dt na saída do inversor, visto que a filosofia de operação, que é aumentar o tempo de subida do pulso, o que é um ponto comum na questão da eliminação dos dois modos [34].

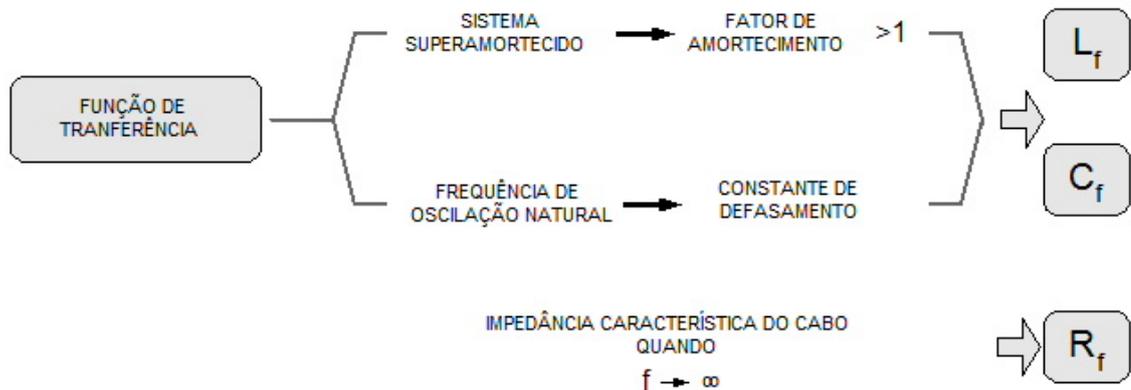


Figura 3.2: Considerações para Dimensionamento do Filtro dv/dt

A redução das grandezas indesejadas do modo comum, entretanto, não aconteceu de forma significativa que possa diminuir a tensão de eixo e evitar as correntes de rolamento e correntes de modo comum para a terra [34].

3.2 Topologias de Filtro para a Atenuação Simultânea de Sobretensão e de Correntes de Modo Comum

Várias topologias de filtro têm sido propostas com o objetivo de reduzir problemas de sobretensão e de modo comum com a utilização de filtros passivos. Aqui serão apresentadas algumas topologias que sugerem modificações na instalação ou inserção de componentes específicos para reduzir os problemas de modo comum e critérios para seu projeto e dimensionamento. Como o objetivo principal neste estudo é analisar métodos que minimizem tanto os fenômenos de modo comum quanto os fenômenos de modo diferencial de forma conjunta, são citados alguns projetos encontrados na literatura que partem da

estrutura do filtro dv/dt e adicionam técnicas para redução dos fenômenos de modo comum, constituindo-se apenas de elementos passivos, começando por estruturas com simples modificações na instalação até a inserção de elementos específicos para modo comum. Tal estudo passa por etapas como objetivo, critérios de dimensionamento e outras características.

3.2.1 Filtro RLC Conectado ao Barramento

Em uma das topologias que visam a redução tanto dos fenômenos de modo diferencial quanto do modo comum, observa-se resultados interessantes ao se desenvolver uma configuração simples, partindo-se da estrutura do filtro dv/dt estudado (RLC conectado na saída inversor), que apresenta bons resultados na redução das sobretensões, onde foi sugerida uma modificação de instalação para redução do modo comum [2]. O projeto consiste de uma rede RLC conectada na saída do inversor com o ponto de neutro do filtro conectado ao ponto médio do barramento de corrente contínua (Fig. 3.3), medida que reduz os problemas de modo comum nos terminais do motor ao desviar a corrente de modo comum para o barramento. Devido ao fato desta topologia só oferecer essa conexão como forma de atenuar os fenômenos de modo comum, a mesma não apresenta redução de forma conclusiva da tensão de eixo e correntes de modo comum. Além disso, tem-se que as perdas são quase duas vezes maiores que as apresentadas pela topologia convencional.

O mecanismo do filtro para reduzir os fenômenos de modo comum é analisado da seguinte forma: A tensão entre os terminais do motor e a terra é a soma da tensão entre o ponto médio do barramento de corrente contínua e a terra (tensão devido ao retificador, que segundo a referência, é uma tensão triangular de baixo dv/dt) e da tensão entre o ponto médio do barramento e os terminais do motor (tensão de alto dv/dt). Portanto, conforme

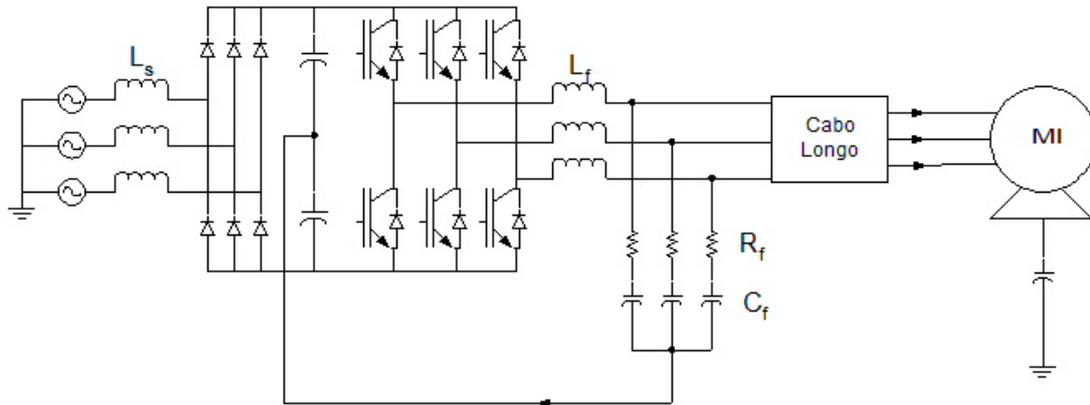


Figura 3.3: Filtro RLC conectado ao Barramento de Corrente Contínua

será detalhado em seguida, a tensão entre os terminais do motor e aterra apresentará baixo dv/dt devido à configuração do filtro.

Critérios e considerações para dimensionamento

Nesta etapa, primeiramente, foram feitas análises e obtenção de equações para a tensão de modo comum, instantânea e em regime permanente, entre os terminais do motor e o barramento de corrente contínua para várias situações do sistema: sistema sem cabos longos e sistema com filtro. O objetivo principal desta análise é mostrar que, a conexão do ponto de neutro de filtro ao ponto médio do barramento de corrente contínua, faz com que o ramo $R_f C_f$ passassem a ser parte do circuito para o modo comum.

A sugestão é que a tensão instantânea de modo comum pode ser reduzida aplicando-se um valor de pequena resistência e valor alto para capacitância, de forma que seja fornecido um valor menor de impedância equivalente para as correntes de modo comum. Entretanto, esta prática deve ser melhor analisada sob pena de interferir de forma prejudicial no desempenho do filtro em atenuar as sobretensões transitórias. Há que se considerar também as perdas apresentadas por esta filosofia de dimensionamento quando comparada ao filtro sem acoplamento [2].

A análise para redução do modo comum é feita de forma simplificada e não são estabelecidos critérios de dimensionamento para os elementos do filtro, o que acaba por comprometer sua eficácia e levar a exaustivas análises empíricas para determinação de parâmetros adequados. Detalhes de otimização estão em uma patente [40].

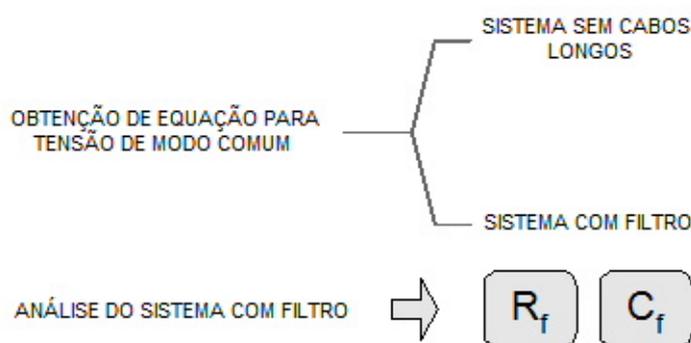


Figura 3.4: Considerações para Dimensionamento do Filtro RLC conectado ao Barramento de Corrente Contínua

3.2.2 Filtro RLC - Rede dupla

Com o objetivo de reduzir dv/dt de modo comum e diferencial sem a necessidade de conexão com o ponto médio do barramento de corrente contínua, foi sugerido que a rede R_f L_f C_f fosse dividida em duas redes separadas [3]. É feita a ligação do ponto de neutro das redes nos pontos positivo e negativo do barramento de corrente contínua, com o objetivo de redução simétrica do dv/dt em cada transitório de chaveamento, não havendo necessidade de acessibilidade ao neutro do barramento de corrente contínua. Neste projeto, as figuras principais do filtro são os resistores e os indutores.

O aumento no tempo de subida dos pulsos de tensão é alcançado pela seleção correta das constantes de tempo do filtro. Com a rede dividida em duas, provavelmente há aumento de perdas, custo e tamanho do filtro.

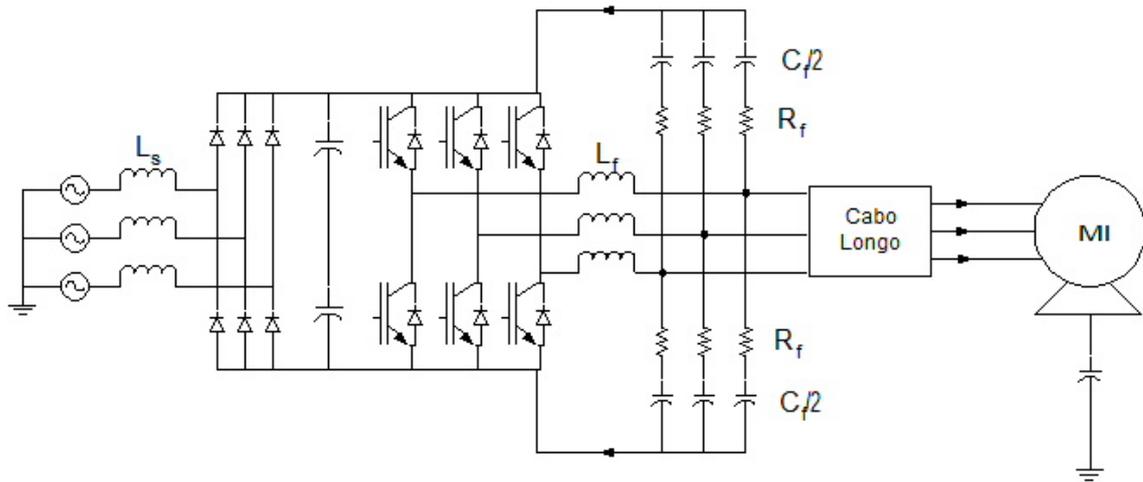


Figura 3.5: Filtro RLC Duplo

Critérios e considerações para dimensionamento

Embora seja feita análise para dimensionamento semelhante à anterior, é sugerido um método para determinação dos parâmetros baseado na relação entre tempo de subida e comprimento crítico do cabo. Deve-se, entretanto, manter o valor da impedância equivalente da topologia de rede dupla igual ao valor da impedância equivalente da topologia de rede simples.

A redução da tensão de modo comum pode ser atingida através do preciso dimensionamento dos parâmetros do filtro proposto (R_f e C_f - resistências e indutâncias de cada rede do filtro). O filtro pode ser dimensionado em função do tempo crítico de subida, que depende fortemente do comprimento do cabo conectado entre inversor e motor. Usando a equação exponencial dos pulsos de saída do inversor, ao passarem pelo filtro, os valores dos componentes necessários para reduzir o dv/dt podem ser expressos em termos do tempo crítico de subida, τ_s , da seguinte forma:

$$V(t) = V_{cc}(1 - e^{-\frac{\tau_s}{T}}) \quad (3.1)$$

Onde $\Gamma = \frac{1}{\omega_0} = \sqrt{L_f C_f}$

O critério utilizado para o cálculo do capacitor é a seguinte expressão (não são fornecidos maiores detalhes de sua obtenção):

$$C_f = \ell_c * 500 \times 10^{-12} \quad (3.2)$$

Onde ℓ_c é o comprimento do cabo em ft (pés).

A partir da relação:

$$\sqrt{L_f C_f} \geq \tau_s \quad (3.3)$$

e do valor de C_f obtido anteriormente, determina-se o valor do indutor. Já a resistência é calculada de forma a realizar o casamento de impedâncias entre cabo e motor, como se segue:

$$R_f \geq \sqrt{\frac{4L_f}{C_f}} \quad (3.4)$$

Para o indutor ainda foram incluídas características de dimensionamento: núcleo toroidal feito de material cuja permeabilidade permaneça constante em uma larga faixa de frequências, na faixa de 100 kHz. Segue-se então os passos [3]:

- Determinar o valor do indutor;
- Selecionar o material dependendo da frequência de operação;
- Selecionar a seção transversal do condutor em função da corrente no indutor;
- Através das especificações do material, obter o valor da indutância por enrolamento;
- Calcular o número de enrolamentos;

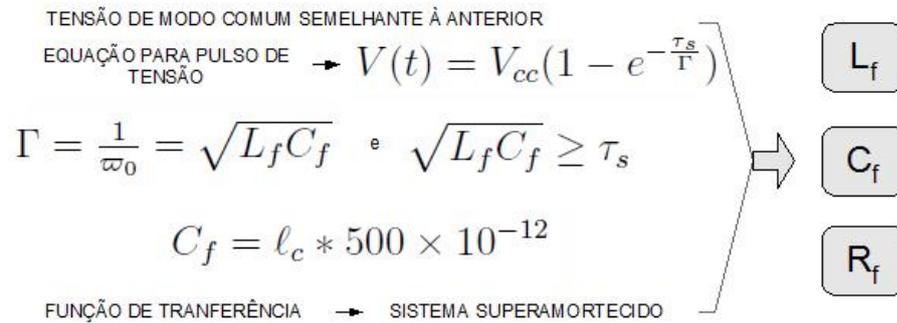


Figura 3.6: Considerações para Dimensionamento do Filtro RLC Duplo

As perdas nessa topologia existem, principalmente, devido aos resistores e aumentam linearmente com a frequência de chaveamento. Isso acontece porque o filtro opera em cada subida e descida dos pulsos de saída do inversor, e aumentando-se a frequência de chaveamento, aumenta-se o número de pulsos por unidade de tempo. No entanto, é importante também considerar as perdas nos outros elementos.

3.2.3 Filtro com Transformador de Modo Comum

Outra configuração sugere o filtro $L_f C_f$ em série com um transformador de modo comum e também se apresenta como alternativa na aplicação de redução dos dois modos [33]. Seu princípio básico para a redução da tensão do modo comum é que o "caminho" da corrente de modo comum é fornecido antes do cabo, e a tensão de modo comum é aplicada nos indutores. Ou seja, o transformador de modo comum "retém" a tensão de modo comum e a conexão ao barramento desvia a energia referente às componentes de alta frequência da tensão de modo comum para o barramento. Após o dimensionamento deste filtro os valores de L_f , R_f e C_f não podem ser mudados, de maneira que se o comprimento do cabo entre o inversor e o motor mudar, o efeito do filtro ficará limitado ao modo diferencial.

A rede de capacitores tem duas funções: uma é de construir um filtro de modo diferencial com indutores e a outra é ser usada como detector de tensão de modo comum para fornecer corrente para o transformador.

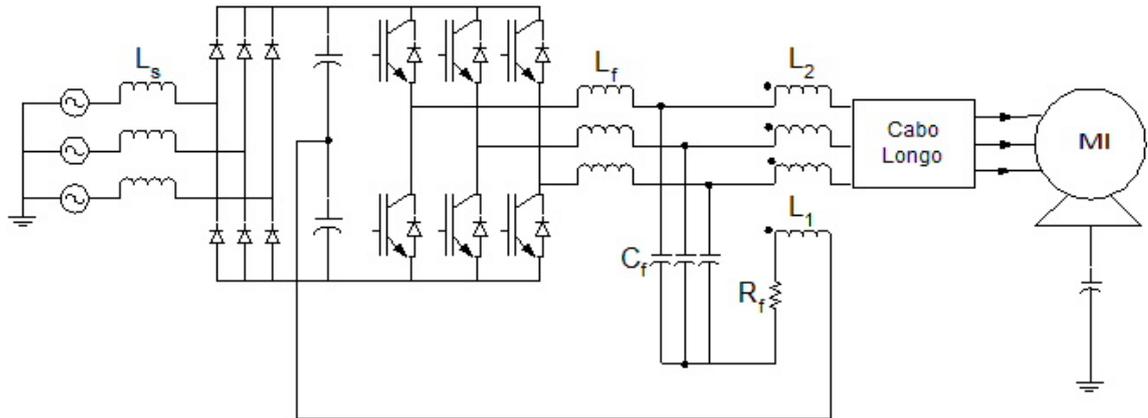


Figura 3.7: Filtro dvdt e Transformador de Modo Comum

Critérios e considerações para dimensionamento

Basicamente os pontos chave para especificação dos elementos que compõem este modelo de filtro são [33]:

- Análise do circuito equivalente de modo comum por fase;
- Representação do transformador de modo comum e do filtro no domínio da frequência;
- Equação característica considerando estado inicial zero;
- Determinação do coeficiente de acoplamento e da indutância mútua do transformador de modo comum;
- Para que a redução do modo comum se efetive, é necessário que a função de transferência do filtro tenha características passa baixa para redução do componente de

alta frequência. Usa-se o coeficiente de acoplamento do transformador igual a 1 e a razão de transformação também igual a 1 para atender a essa especificação.

O processo de dimensionamento pode ser dividido em dois passos. Primeiramente, configura-se os valores de L_f e C_f de acordo com as demandas para o modo diferencial dv/dt [3]. Esse passo pode ser feito independentemente porque o transformador de modo comum não tem efeito no modo diferencial.

Obtem-se, então, a função de transferência do filtro. Para que o filtro tenha características passa baixas é feita uma adequação da função de transferência. O resultado desta adequação é que o acoplamento do transformador seja ideal. Outra condição para o fechamento do cálculo do valor de L_c é dado pela equação:

$$L_c \approx (2 \sim 3)L_f \quad (3.5)$$

Entretanto, não são fornecidos maiores detalhes da obtenção desta relação.

Considerando que o principal harmônico da tensão de modo comum é relacionado à frequência de chaveamento, determina-se que:

$$\omega_n \ll 2\pi f_s \quad (3.6)$$

Desta forma, elimina-se a ressonância devido ao harmônico de maior ordem.

O resistor pode ser obtido da equação do fator de amortecimento ξ :

$$R_f = \frac{2\xi}{3} \sqrt{\frac{3L_c + L_f}{C}} \quad (3.7)$$

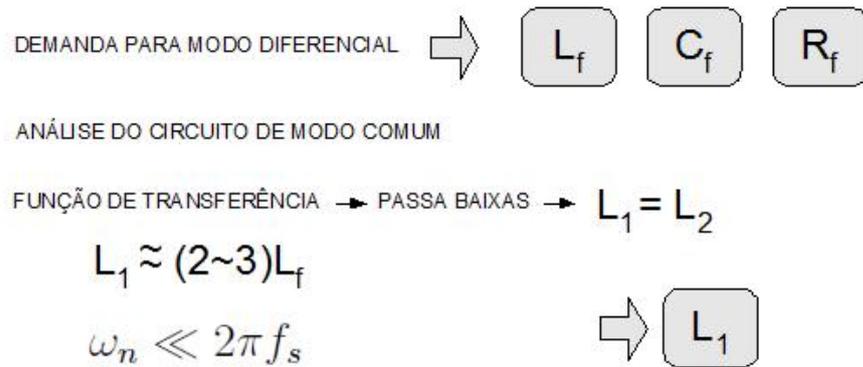


Figura 3.8: Considerações para Dimensionamento do Filtro dv/dt e Transformador de Modo Comum

Uma das características da utilização do transformador de modo comum em lugar do indutor de modo comum é a redução no valor rms e valor médio da corrente de dispersão, enquanto que o indutor reduz seu valor de pico. A diferença entre eles é a configuração, o transformador de modo comum é um indutor de modo comum com um enrolamento a mais, geralmente isolado.

3.2.4 Filtro com Tensão de Saída Senoidal

Outra topologia emprega o filtro dv/dt , indutor de modo comum e conexão ao ponto médio ao negativo do barramento de corrente contínua, esta configuração tem por objetivo a redução também do dois modos de maneira a se obter tanto a tensão entre fases como a tensão entre fase e neutro puramente senoidais [34]. Essa topologia, apesar de se configurar em um filtro senoidal, possui especificações apuradas de dimensionamento incluindo estudo de saturação do indutor de modo comum.

O filtro consiste basicamente de três indutores de modo diferencial, um indutor de modo comum e resistores. O conjunto de três indutores L_f , três capacitores C_f e três resistores R_f formam o filtro de modo diferencial. Embora esta topologia garanta a forma

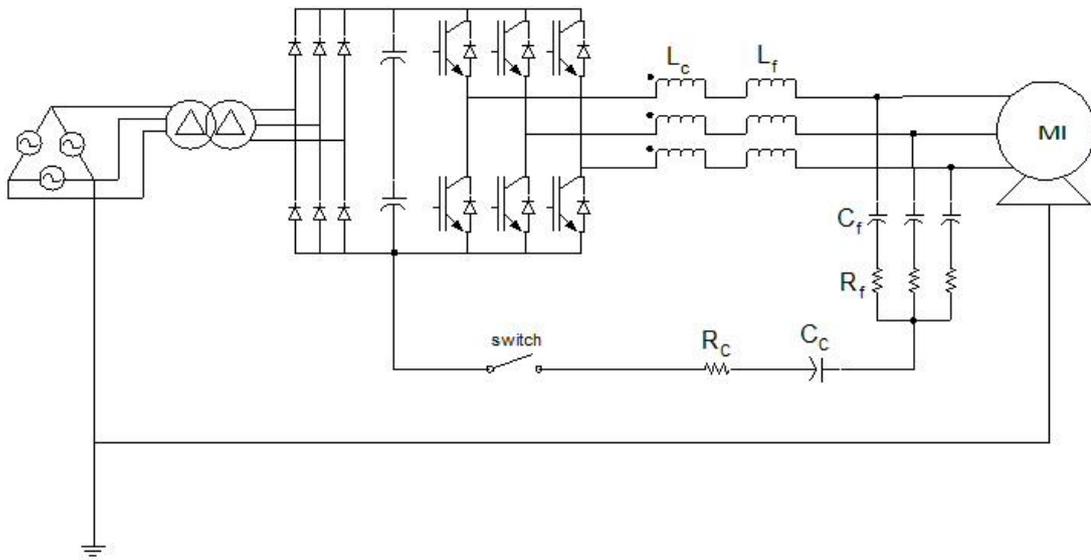


Figura 3.9: Filtro com tensão de saída senoidal

de onda senoidal das tensões entre fases, não produz efeito significativo na tensão de neutro.

O indutor de modo comum L_c tem os três enrolamentos com a mesma polaridade em uma estrutura magnética comum. Dessa forma, pode-se garantir alta impedância de modo comum e impedância de modo diferencial praticamente nula. Nesta topologia a ligação do filtro com o inversor é feita conectando-se o ponto de neutro do filtro ao ponto negativo do barramento de corrente contínua. Nesta ligação estão presentes o capacitor de modo comum C_c e o resistor de modo comum R_c , que juntamente com L_c formam o filtro para o modo comum.

Critérios e Considerações para o Dimensionamento

O dimensionamento dos componentes do filtro de modo diferencial e dos componentes do filtro de modo comum são feitos separadamente, não havendo interferências de um modo em outro [34].

Em se tratando de um filtro senoidal cujo objetivo é filtrar os harmônicos, e como estes

geralmente harmônicos se manifestam em ripple de corrente, este foi o ponto de partida da análise para o dimensionamento. Para o filtro de modo diferencial, parte-se do princípio de que o indutor é o componente determinante considerando-se a amplitude de corrente. A condição de projeto para dimensionamento do indutor, analisando o circuito equivalente para o filtro diferencial, na frequência de chaveamento, é determinar um *ripple* para a corrente de chaveamento $< 10\%$. A frequência de ressonância é utilizada para cálculo de C_f e o limite de perdas permitido para o caso estudado, determina R_f .

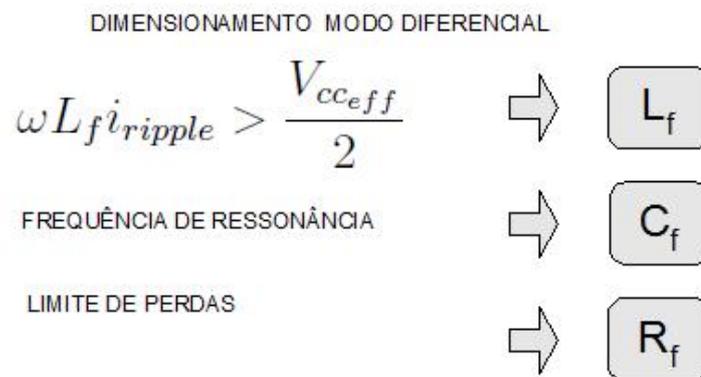


Figura 3.10: Considerações para Dimensionamento do Filtro com tensão de saída senoidal - Filtro Diferencial

O dimensionamento do filtro de modo comum leva em conta as componentes predominantes da tensão de modo comum. A tensão de modo comum é composta de componentes CA e CC: as componentes CC são aplicadas ao capacitor C_c e as componentes CA são aplicadas ao indutor L_c .

Dessa forma, é obtida uma aproximação senoidal da componente CA da tensão de modo comum. Então, o fluxo produzido no indutor é obtido pela integração dessas componentes com relação ao tempo.

Deve-se levar em conta o efeito das componentes da frequência de chaveamento presentes na tensão de modo comum no fluxo de saturação, ignorando os outros componentes. A componente foi, então, aproximada como uma função tendo forma de onda senoidal e amplitude estabelecida através de medições experimentais e frequência igual a de chaveamento. A partir daí, pode-se obter a relação entre fluxo no indutor e tensão de modo comum:

$$\phi = \frac{1}{N} \int v_{MC} dt \quad (3.8)$$

Onde N é o número de voltas por fase do indutor. A densidade de fluxo é determinada por:

$$B = \frac{\phi}{S} = \frac{1}{SN} \int v_{MC} dt \quad (3.9)$$

Onde S é a área da seção transversal do núcleo. E finalmente L_c é obtido através da seguinte relação:

$$L_c = \frac{\mu SN^2}{l} \quad (3.10)$$

Onde l é o comprimento do núcleo, e μ a permeabilidade do núcleo.

O valor de L_c pode ser determinado partindo-se de uma das seguintes considerações:

Primeira: O valor de pico da corrente de modo comum é inversamente proporcional ao valor da indutância, portanto é diretamente proporcional ao valor de l/N , contanto que SN seja constante. Então quanto menor o comprimento médio do núcleo e maior o número de voltas, menor será o valor de pico do modo comum. Entretanto, o número de voltas não pode aumentar além de um certo limite sob pena de se necessitar de um núcleo maior e resultar em um comprimento médio maior. Isto significa que existe um

valor ótimo da razão l/N , que depende do diâmetro do cobre dos enrolamentos utilizados, em outras palavras, do índice de corrente do indutor.

Segunda: Alternativamente, pode-se estabelecer um valor de fluxo de saturação máximo, considerando-se o valor da tensão de modo comum quando o sistema opera em baixas velocidades ou em baixas frequências, e assim dimensionar SN . A partir daí é estabelecido o valor de L_c .

O capacitor C_c é determinado a partir da escolha da frequência de ressonância do circuito de modo comum.

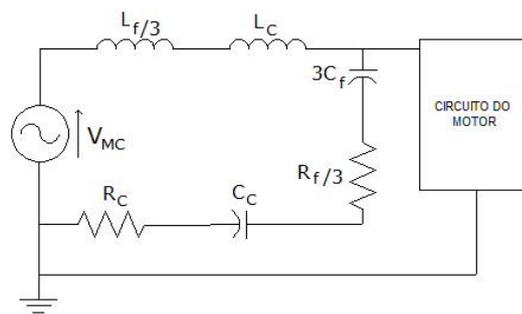


Figura 3.11: Circuito Equivalente para os Componentes de Modo Comum

O resistor R_f é dimensionado de forma a se manter um fator de qualidade pré determinado.

No circuito equivalente para o modo comum é sugerido que, para alcançar a operação independente dos dois filtros, se faça $L_c \gg L/3$ e $C_c \ll 3C$. Pela análise da impedância de modo comum do motor, nota-se que sua capacitância equivale a aproximadamente 1% do valor de C_c , podendo, portanto, ser retirada do circuito equivalente.

O valor rms da tensão de modo comum é maior em frequências de saída menores. Então, o valor rms é maior quando o motor é acionado ou o inversor opera em baixas frequências. Uma análise sobre saturação magnética do indutor de modo comum quando

o motor é ligado ou o inversor opera em baixa frequência mostra que o alto valor rms da tensão de modo comum nestas condições pode levar o indutor a saturação magnética. Tal estudo deve ser levado em conta no dimensionamento do indutor de modo comum.

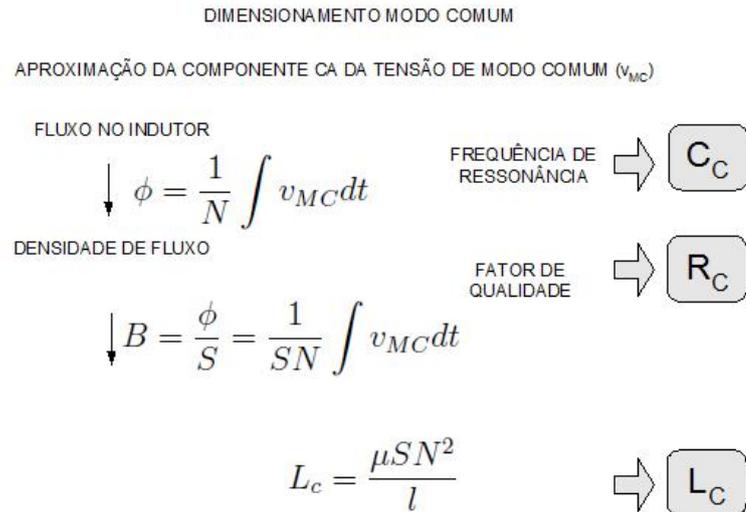


Figura 3.12: Considerações para Dimensionamento do Filtro com tensão de saída senoidal - Filtro Modo Comum

Essas observações fornecem importantes informações para entendimento dos efeitos de saturação nos indutores de modo comum e ajuda a estabelecer critérios de dimensionamento corretos para evitar tal fenômeno. Fica claro que nenhuma saturação magnética ocorrerá se o indutor de modo comum é dimensionado levando em conta as piores condições de operação de 0V em 0Hz. Felizmente, a densidade de fluxo nesse ponto de operação é fácil de calcular visto que a forma de onda da tensão de modo comum é retangular e tem amplitude de metade da tensão do barramentos de corrente contínua.

O que se pode concluir destas análises é que as topologias de filtros dv/dt e modo comum têm alcançado um nível de desenvolvimento com melhorias constantes de qualidade em termos de análise e metodologia de projetos em transitórios de sobretensão, tensão de modo comum, tensão de eixo e minimização da circulação de correntes de dispersão pela

malha de aterramento.

Algumas topologias ainda não foram implementadas no modelo de simulação desenvolvido neste trabalho, como configurações que empregam transformadores de modo comum, constituindo uma das propostas de continuidade de aprimoramento deste modelo na busca de maior abrangência para análise computacional de modelos de filtros.

3.3 Conclusões

Este capítulo buscou contemplar as características principais de algumas topologias de filtros dv/dt e modo comum. Foram detalhadas questões inerentes à análise e critérios de dimensionamento.

De maneira geral o dimensionamento dos componentes para o modo diferencial é feito de forma separada ao dimensionamento dos componentes de modo comum. Deve-se estudar de forma mais aprofundada quais as reais necessidades do sistema em questão e qual a metodologia de projeto trará melhor benefício quando da implementação.

Pode-se citar algumas características como primordiais para o desenvolvimento do projeto de filtros. O filtro dv/dt deve apresentar características de um sistema superamortecido de modo que o cabo deve seja modelado de forma a representar características principais na propagação em altas frequências.

Métodos de mitigação da tensão de modo comum devem incluir a análise das componentes de alta frequência que estão presentes e contribuem para correntes de dispersão para a terra, indução de tensão de eixo e correntes de rolamento. A análise da tensão de modo comum contemplando o espectro harmônico e componentes de maior influência,

abordando de forma mais realista o comportamento do modo comum no sistema contribui de forma bastante significativa no dimensionamento dos elementos, principalmente do indutor ou do transformador de modo comum.

Capítulo 4

Desenvolvimento e Implementação do Modelo Computacional

Na busca da forma adequada de desenvolvimento e implementação do modelo de simulação escolheu-se, dentre os programas do tipo EMTP (Electromagnetic Transients Program) de análise de transitórios eletromagnéticos de sistemas elétricos, o programa PSCAD/EMTDC[©]. Existem, disponibilizados na biblioteca do programa, modelos para cabos tanto no domínio dos modos quanto no domínio das fases próprios para estudo de respostas no domínio do tempo. Dentre eles, um modelo para cabos de potência localizados sobre o solo a parâmetros distribuídos e dependentes da frequência no domínio dos modos foi formulado e implementado para a análise e comprovação de sua confiabilidade, além de apresentação de aspectos gerais fornecendo um guia de utilização rápida e detalhes importantes da utilização do programa [37].

Uma das contribuições deste trabalho é apresentar o modelo computacional representando o sistema de acionamento que contemple todos os elementos presentes neste sistema e levando em conta seu comportamento em altas frequências. A análise é feita no domínio das fases, de forma a se visualizar os fenômenos de modo diferencial e de modo comum em um único modelo, constituindo-se em uma forma prática para entendimento e análise, para que funcione como ferramenta adicional para avaliação de possíveis soluções e otimização de projetos de filtros passivos conectados na saída do inversor. São feitas simulações para

sistema 220 V, motor de 3 hp e cabos de comprimentos de 20 m e 100 m, permitindo a observação tanto sobretensão quanto circulação de correntes de modo comum através desta única representação. Desta forma pode-se utilizar o modelo para implementação de topologias de filtros dv/dt e modo comum e análise de seu desempenho, conforme será apresentado.

4.1 Descrição do Sistema para Simulação

Para o estudo de fenômenos transitórios em sistemas contendo inversor, cabo e motor, é preciso que, no desenvolvimento do modelo de simulação, sejam incluídas características dos pulsos de tensão, comportamento de linha de transmissão apresentado pelos cabos na propagação dos pulsos de tensão, impedância de entrada do motor e capacitâncias parasitas presentes no sistema. Todas essas etapas devem ser estudadas na faixa de frequências correspondente ao pulso de tensão.

O programa escolhido para implementação do modelo, PSCAD/EMTDC[©], é de simples utilização por possuir uma interface gráfica que permite a construção esquemática do circuito, processar simulações, analisar os resultados e administrar os dados em um ambiente integrado. A resposta transitória é calculada diretamente no domínio do tempo e a solução é determinada para cada instante de tempo. A seguir, são descritas as características e os detalhes de implementação do sistema de acionamento. Na Fig.4.1 pode-se ver o esquema de construção do sistema de simulação computacional. São mostrados os elementos presentes no sistema de acionamento, desde o controle do acionamento, como a representação do cabo e dos modelos de baixa e de alta frequência do motor.

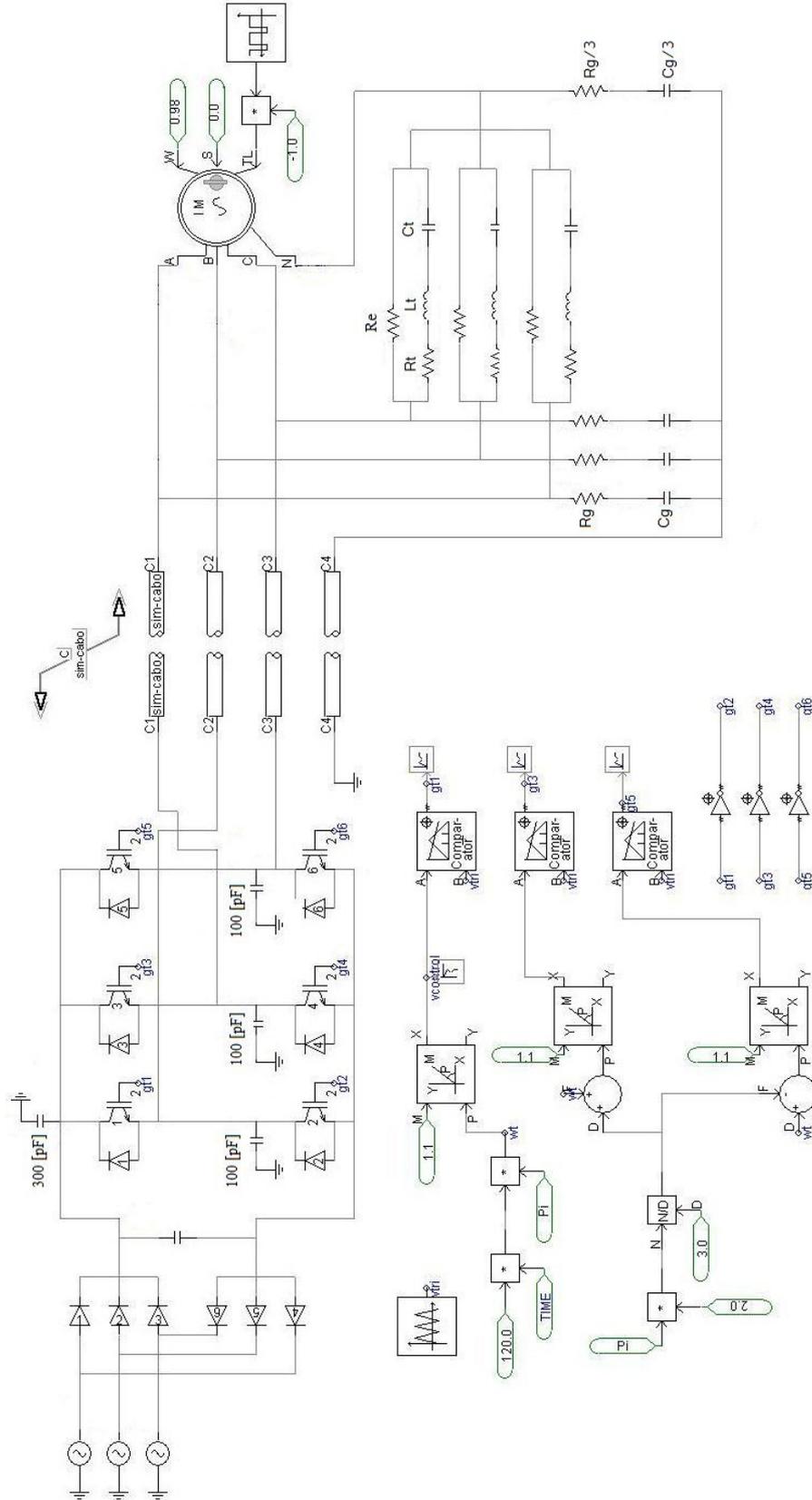


Figura 4.1: Modelo proposto do sistema para implementação no PSCAD/EMTDC[©], incluindo representação do motor para altas frequências [1]

4.1.1 Modelos dos Cabos de Acionamento

A modelagem do cabo para a análise dos transitórios de chaveamento é um ponto fundamental para a confiabilidade da simulação. É requisito primordial que esta representação leve em conta a natureza distribuída do cabo e a variação dos seus parâmetros com a frequência de forma a representar o comportamento apresentado pelos cabos diante dos pulsos de tensão de saída do inversor.

O programa de simulação PSCAD/EMTDC[©] possui, disponibilizados em sua biblioteca, modelos prontos de cabos e linhas de transmissão destinados a análise de transitórios eletromagnéticos. Alguns modelos encontrados na biblioteca do programa possuem características como representação em parâmetros distribuídos e dependentes da frequência que são os mais adequados ao estudo dos fenômenos aqui analisados.

Para a criação e implementação de um modelo de cabo no programa deve-se determinar algumas características físicas, elétricas e determinação de parâmetros de simulação adequados ao cenário a ser analisado. Neste modelo, o cabo foi representado usando-se uma linha de transmissão tetrapolar, onde um condutor opera como caminho de retorno para as correntes de modo comum, por ser esta uma configuração comumente usada em sistemas de acionamentos. Na Fig.4.2 é mostrada como são representadas as características físicas de construção do cabo - posicionamento dos condutores, espessura da camada isolante, raio dos condutores, etc. - em uma interface adicional à que está inserido o modelo completo.

O cabo é representado por duas matrizes: a matriz do fator de propagação e a matriz de admitância característica, que são funções dependentes da frequência. Ao se escolher o modelo no domínio das fases, é preciso determinar a faixa de frequências para a qual será realizada a síntese das funções racionais polinomiais aproximadas e o número de pólos e

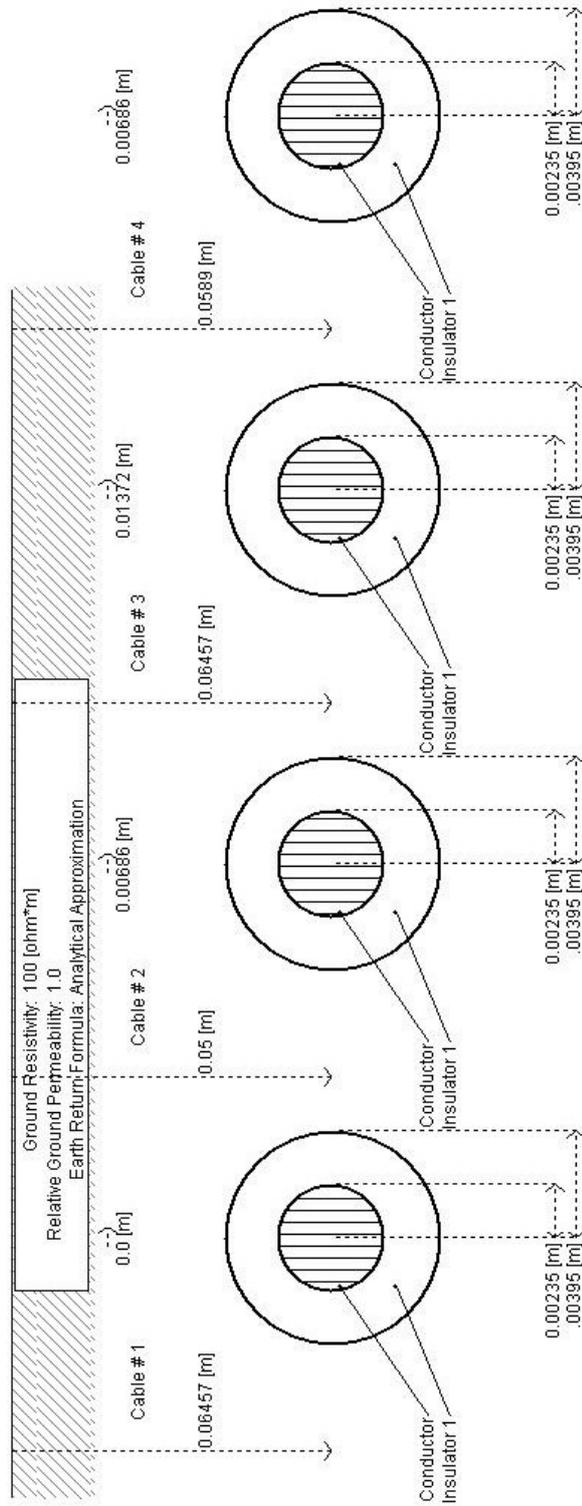


Figura 4.2: Dimensões físicas do cabo implementado no PSCAD/EMTDC[©]

resíduos que serão utilizados na determinação da admitância característica e do fator de propagação.

No software utilizado, há um editor onde é determinado o comprimento do cabo. Neste mesmo editor pode-se realizar a modelagem física do cabo como escolha do número e dimensão das camadas que compõem o modelo e a localização em relação ao solo.

O modelo do cabo utilizado no sistema leva em conta algumas características fundamentais como:

- Parâmetros distribuídos: Leva-se em conta o princípio de propagação de ondas, contemplando-se atenuações e atrasos de tempo provenientes de distúrbios do sistema.
- Parâmetros dependentes da frequência: São calculados para uma extensa faixa de frequências, tendo maior capacidade de representação do fenômeno físico da propagação de ondas.
- Modelo no domínio das fases: Determina o comportamento dinâmico do sistema diretamente no domínio das fases. São modelos mais precisos.

São analisadas sobretensão (entrada do motor), tensão de modo comum (saída do inversor e entrada do motor) e correntes de alta frequência que circulam pela terra (retorno do terra ao inversor), visto que o quarto condutor atua como caminho de circulação das correntes do modo comum. O modelo de simulação é muito útil para prever a amplitude desses tipos de correntes e sua atenuação através da inserção de diferentes estruturas de filtros passivos. Os cabos simulados possuem características físicas diferentes para se adequarem aos cabos do sistema real e possibilitar futuras comparações entre os resultados de simulação e medidas experimentais.

Os cabos simulados são tetrapolares e têm como principais características:

- Cabo de 20 m \Rightarrow raio do condutor: 2,35 mm.
- Cabo de 100 m \Rightarrow raio do condutor: 1,05 mm.

4.1.2 Modelo do Sistema Retificador - Inversor

Visto que as correntes de modo comum circulam através de capacitâncias parasitas presentes entre todos os elementos do sistema de acionamento e a terra, há necessidade de se representar também, as capacitâncias presentes no inversor. Então, neste modelo são adicionadas:

- Capacitâncias de cada fase do inversor para a terra.
- Capacitância do barramento de corrente contínua para a terra.

Tanto o retificador quanto o inversor são modelados através de elementos e dispositivos representativos presentes na biblioteca do programa. O princípio de funcionamento do inversor segue a geração de modulação por largura de pulso de forma simples, onde uma onda triangular é gerada na frequência desejada e comparada à onda senoidal da rede inserida num bloco para mudanças de coordenadas polar para retangular e em seguida é inserida juntamente com a triangular no comparador. As três respostas de saída são invertidas para inserção nos circuitos de gatilho correspondentes. A tensão da rede de alimentação é de 220 V e os capacitores do barramento de corrente contínua formam uma capacitância equivalente de 2000 μF .

É possível que sejam implementadas outras formas de modulação neste modelo do inversor [41]. A implementação de diferentes modulações constitui uma forma de análise

importante para se observar o comportamento dos fenômenos estudados atuando-se diretamente na fonte que gera tais problemas.

4.1.3 Modelo do Motor de Baixa e Alta Frequência

O modelo do motor utilizado na topologia de simulação apresentada neste trabalho é bastante eficiente em representar os fenômenos de alta frequência. Para este modelo [12], tanto fenômenos de alta quanto fenômenos de baixa frequência são apropriadamente representados, conforme breve descrição de seus parâmetros e suas funções na simulação:

- Modelo dinâmico dq: Responsável por capturar componentes de baixa frequência. Na simulação utilizou-se o modelo para representação do motor de indução existente na biblioteca do programa de simulação PSCAD/EMDTC[©].
- R_t , L_t e C_t : Rede responsável por representar fenômenos de alta frequência e responsável por capturar a segunda ressonância na resposta em frequência que está relacionada à capacitância entre os enrolamentos. Essa ressonância aparece entre a capacitância entre enrolamentos e a indutância de dispersão.
- C_g : Representa a capacitância entre enrolamentos.
- R_g : Representa os efeitos dissipativos existentes na carcaça do motor.
- R_e : Responsável por contabilizar as perdas magnéticas.

Os parâmetros C_g e a capacitância entre enrolamentos têm maior influência nos fenômenos de alta frequência. A impedância do motor para a terra, em altas frequências, é muito baixa (Tabela 4.1), visto que nessas condições os acoplamentos capacitivos representam

praticamente curto-circuitos à terra. Estando a carcaça da máquina aterrada, haverá a circulação de correntes de alta frequência pelo terra (correntes de modo comum).

Tabela 4.1: Parâmetros do Sistema [5, 6]

Sistema de Acionamento							
Dados do Motor							
3hp - 230/460V - 3 ϕ - 60Hz - 9/4.5A - 1755rpm							
Filtro Δ		Motor Baixa Freq.		Motor Alta Freq.		Capacit. Inversor	
R	150 Ω	r1	0.018 pu	Cg	313.6 pF	Fase A	100 pF
L	23 μ H	r2	0.012 pu	Rg	35.5 Ω	Fase B	100 pF
C	138 μ F	x1	0.043 pu	Re	5.6 k Ω	Fase C	100 pF
L _c	100 μ H	x2	0.043 pu	Ct	31.4 pF	Dissipador	300 pF
		xm	0.556 pu	Lt	2.7 mH		
				Rt	1.15 k Ω		

4.1.4 Topologias de Filtros Implementados na Simulação

Atualmente, filtros passivos são empregados na saída dos inversores para lidar com os problemas de EMI conduzidas, conforme explicado anteriormente. Várias configurações, baseadas em indutores e capacitores ou diodos têm sido propostas. A topologia RLC permite a integração de métodos de filtragem de modo comum, possibilitando o desenvolvimento de metodologias para a integração de ambos projetos.

Serão implementadas no modelo de simulação quatro topologias de filtros conectados à saída do inversor baseadas nas topologias estudadas no Capítulo 3:

- Filtro dv/dt (Fig.4.3);
- Filtro dv/dt acoplado ao ponto médio do barramento de corrente contínua (Fig.4.4);
- Filtro dv/dt acoplado aos pontos negativo e positivo do barramento de corrente

contínua (Fig. 4.5);

- Filtro dv/dt acoplado ao ponto médio do barramento de corrente contínua, incluindo indutor de modo comum (Fig.4.6).

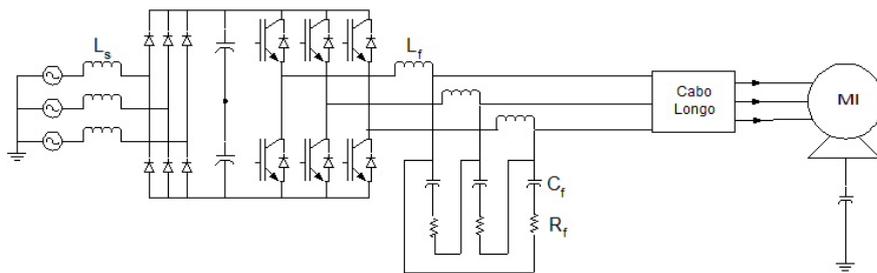


Figura 4.3: Filtro dv/dt [1]

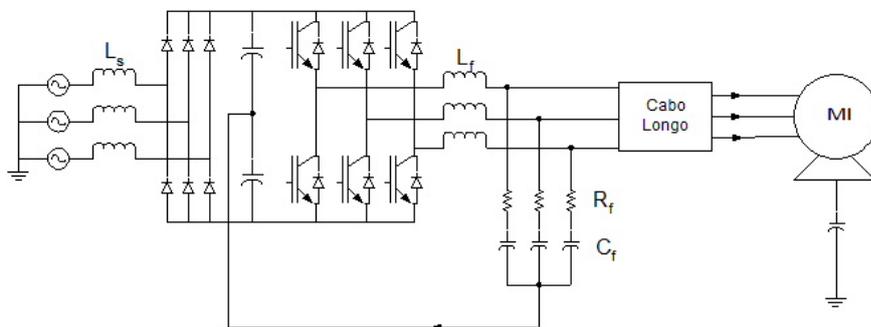


Figura 4.4: Filtro dv/dt acoplado ao ponto médio do barramento de corrente contínua [2]

A Tabela 4.1 fornece valores para os elementos do filtro dv/dt conectado em triângulo, e o valor utilizado para o indutor de modo comum (que foi incluído na última topologia). Entretanto, há que se fazer modificações para implementação das demais configurações:

- Filtro acoplado ao barramento de corrente contínua: Os valores são alterados para conexão em Y (estrela) [2];

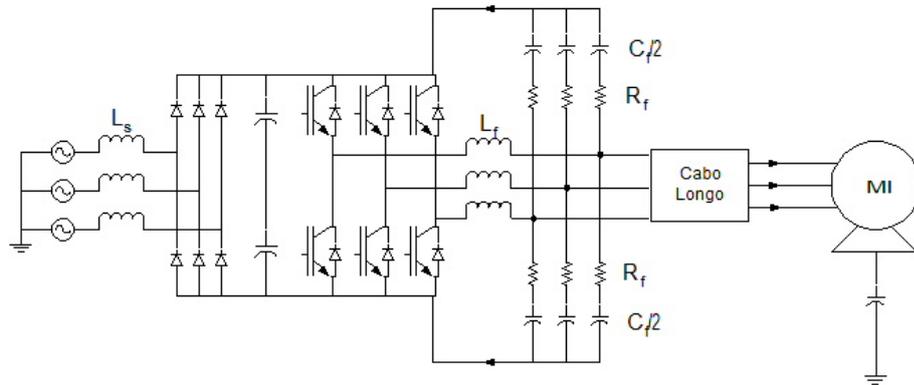


Figura 4.5: Filtro dv/dt acoplado aos pontos positivo e negativo do barramento de corrente contínua [3]

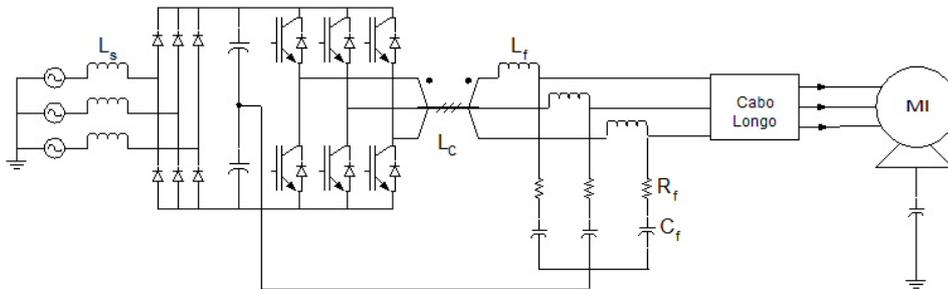


Figura 4.6: Filtro dv/dt acoplado ao ponto médio do barramento e indutor de modo comum

- Filtro duplo: Os valores dos parâmetros devem ser recalculados de forma a se manter o mesmo valor de impedância equivalente do filtro acoplado ao barramento de corrente contínua [3];
- Filtro dv/dt e indutor de modo comum: São utilizados os mesmos valores dos elementos do filtro acoplado ao barramento e é inserido o indutor de modo comum.

A partir de então, para que os dois modos pudessem ser mitigados de forma conjunta, as metodologias para eliminação do modo comum partiram da topologia já existente para o modo diferencial, incluindo-se modificações apropriadas para este modo de forma a compensar perdas, tamanho dos componentes e eficácia.

O filtro com ligação ao barramento de corrente contínua visa reduzir tanto o modo diferencial quanto o modo comum [2]. O projeto consiste de uma rede RLC conectada na saída do inversor com o ponto de neutro do filtro conectado ao ponto médio do barramento de corrente contínua, medida que reduz o modo comum nos terminais do motor ao desviar a corrente de modo comum para o barramento. Os valores da tensão de modo comum instantâneo e em regime permanente podem ser reduzidos empregando-se valores adequados aos componentes do filtro. Para a implementação desta topologia no modelo de simulação, não foram feitas modificações maiores do que a simples conexão do filtro dv/dt da simulação anterior no barramento de corrente contínua.

O filtro com ligação aos pontos positivo e negativo do barramento de corrente contínua, tem o objetivo de redução simétrica dos modos diferencial e comum [3]. Esta ligação se apresenta como alternativa para casos em que o ponto médio do barramento de corrente contínua não se encontra acessível. Dentre as topologias sem o indutor de modo comum, esta se apresentou mais eficiente na redução dos fenômenos de modo comum. Para a implementação desta topologia no modelo de simulação computacional, foram feitas modificações sugeridas no artigo utilizado como referência em que os valores dos capacitores dos filtros são divididos por dois.

A inclusão do indutor de modo comum tem o objetivo de adicionar uma alta impedância ao modo comum. O indutor de modo comum tem os três enrolamentos com a mesma polaridade em uma estrutura magnética comum. De acordo com a direção da corrente de modo comum e a regra da mão direita nota-se que o indutor de modo comum cria um campo magnético que exhibe uma alta impedância aos sinais de modo comum mas baixa impedância para os sinais de modo diferencial conforme já detalhado anteriormente. A representação do indutor de modo comum foi feita com um elemento da biblioteca do

programa que modela três condutores mutuamente acoplados. São requeridos como dados de entrada as resistências dos condutores, as indutâncias próprias e as indutâncias mútuas entre os condutores. O modelo deste filtro implementado na simulação é constituído de um indutor de modo comum, cujo valor não fosse muito grande, associado ao filtro dv/dt acoplado ao barramento de corrente contínua. A finalidade é analisar o desempenho da inclusão do indutor de modo comum na redução dos fenômenos de modo comum, sem a inserção de grandes perdas.

Há ainda a possibilidade de implementação de outras topologias neste modelo que possam configurações semelhantes às apresentadas acima. Os valores utilizados nas topologias de filtro podem ser encontradas na tabela 4.1, onde os parâmetros para o modo diferencial são dados em valores para conexão em delta.

4.2 Resultados de Simulações

O PSCAD/EMTDC[©], opera no domínio do tempo, onde a resposta transitória é calculada diretamente neste domínio e a solução é determinada para cada instante de tempo, portanto, valores adequados deverão ser escolhidos para o passo de integração (Δt) conforme a grandeza que se deseja visualizar. A seguir são apresentados resultados de simulações do modelo computacional desenvolvido para o sistema de acionamento para motor um de 3 hp (4.1), frequência de chaveamento de 5 kHz, e cabos de comprimentos de 20 m e 100 m respectivamente, para as seguintes configurações do sistema:

- Sistema sem filtro;
- Sistema com filtro dv/dt ;

- Sistema com filtro dv/dt acoplado ao ponto médio do barramento de corrente contínua;
- Sistema com filtro dv/dt acoplado aos pontos negativo e positivo do barramento de corrente contínua;
- Sistema com filtro dv/dt acoplado e indutor de modo comum.

Para o sistema sem filtro (Figs. 4.8 e 4.10), pode-se observar que tanto para o cabo de 20 m quanto para o cabo de 100 m a ocorrência de sobretensões transitórias a cada chaveamento. Tais sobretensões têm valores de pico de aproximadamente 600 V, chegando a valores próximos ao dobro do valor da tensão do barramento de corrente contínua. Este resultado é esperado, devido às características apresentadas pelo sistema. É importante ressaltar que as medidas de tensão entre fases e tensão de modo comum estão em escala de kV e a corrente de modo comum está em escala da kA.

Outra característica importante de se observar é que as oscilações das sobretensões transitórias são diferentes para diferentes comprimentos de cabo. Isto acontece devido ao fato de que a frequência das oscilações transitórias de tensão é inversamente proporcional ao comprimento do cabo. Porém, esta frequência não depende somente do comprimento do cabo, mas de outras características do sistema como velocidade de propagação e capacitâncias parasitas do motor. Entretanto, estas características perdem força quando o cabo é muito longo e seus parâmetros passam a ser predominantes.

A tensão de modo comum foi medida nos terminais do motor (final do cabo), onde existem também reflexões que resultam em transitórios a cada degrau da tensão (Figs. 4.9 e 4.11). Para o cabo de 100 metros, o que se observa é uma grande atenuação das oscilações da tensão do modo comum nos terminais do motor.

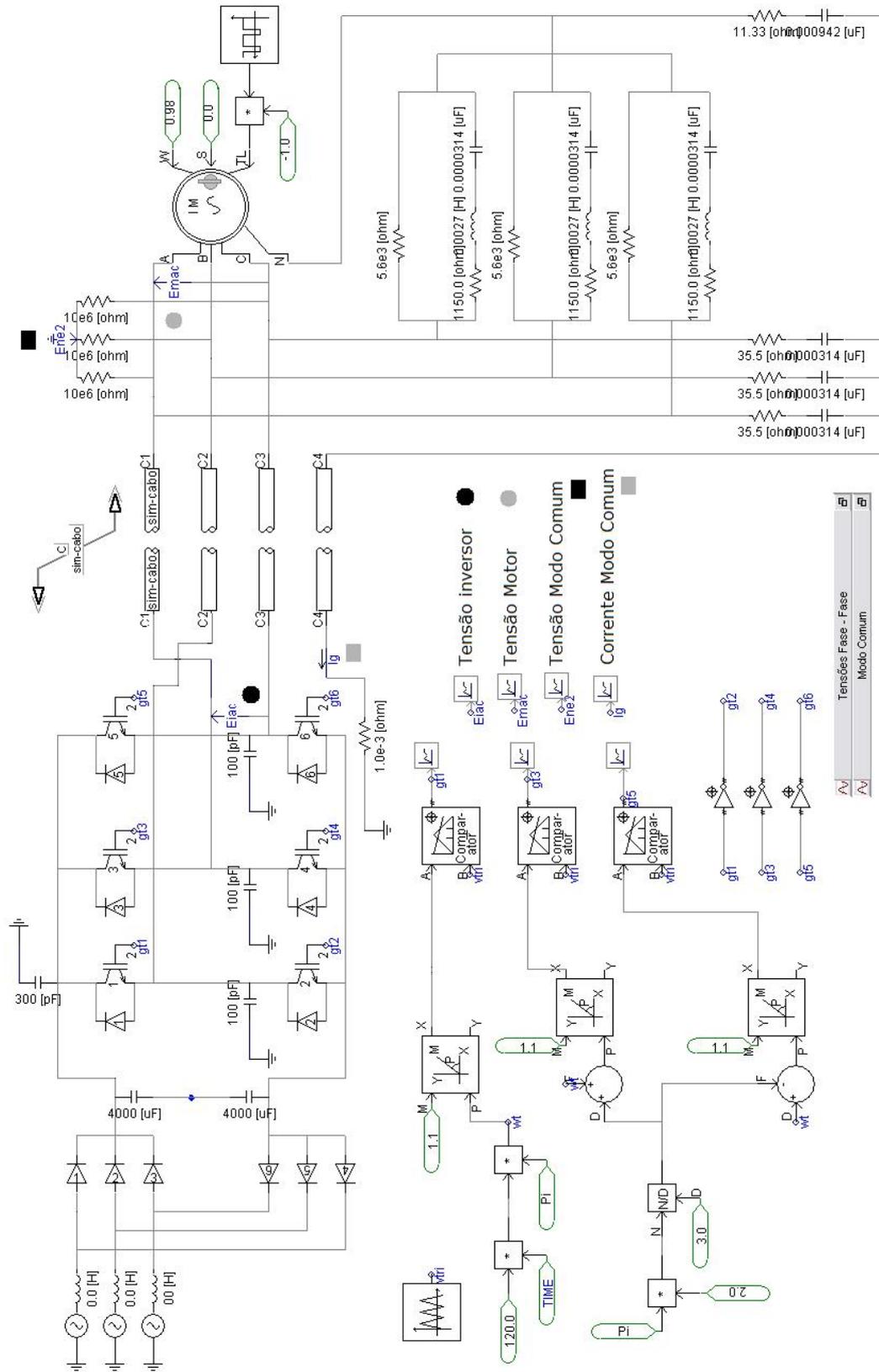


Figura 4.7: Locais onde foram feitas as medições das grandezas apresentadas

A corrente de modo comum ocorre a cada mudança da tensão de modo comum e tem suas oscilações amortecidas para o cabo de 100 m, sendo que os valores de pico observados para o sistema com cabo de 20 m metros são de aproximadamente 2.8 A, enquanto que para o cabo de 100 m chegaram a aproximadamente 3 A. Uma explicação para este fato pode estar baseada na forma de representação do caminho de retorno das correntes de modo comum no modelo de simulação, que inclui capacitâncias do inversor, cabo e motor, mas não representa outras impedâncias presentes no sistema, no restante do caminho de retorno, que possuem forte influência no valor desta corrente.

Com a implementação do filtro dv/dt , houve redução significativa do pico de sobretensão transitória. Conforme mencionado anteriormente, o filtro RLC aumenta os tempos de subida dos pulsos de tensão e, conseqüentemente, aumenta o comprimento crítico do cabo, impedindo o aparecimento de sobretensões transitórias. Houve diminuição de sobretensão para aproximadamente 350 V para o sistema com cabo de 20 m e para aproximadamente 550 V para o cabo de 100 m. A maior eficiência na redução da sobretensão aconteceu para o sistema com cabo de 20 m pois o filtro dv/dt utilizado foi projetado especificamente para este cabo, entretanto, como o projeto deste filtro incluiu uma condição que permitia a aplicabilidade para uma grande variedade de comprimentos de cabos, também pôde-se observar redução das sobretensões para o sistema com cabo de 100 m.

Para o modo comum pode-se perceber uma redução das oscilações da tensão e da corrente. O pico de corrente de modo comum teve diminuição considerável (Figs. 4.13 e 4.15); entretanto, as mudanças são mais significativas para o sistema com cabo de 20 m, aproximadamente 50%. Isto se deve ao fato de que este filtro diminui o dv/dt de modo comum.

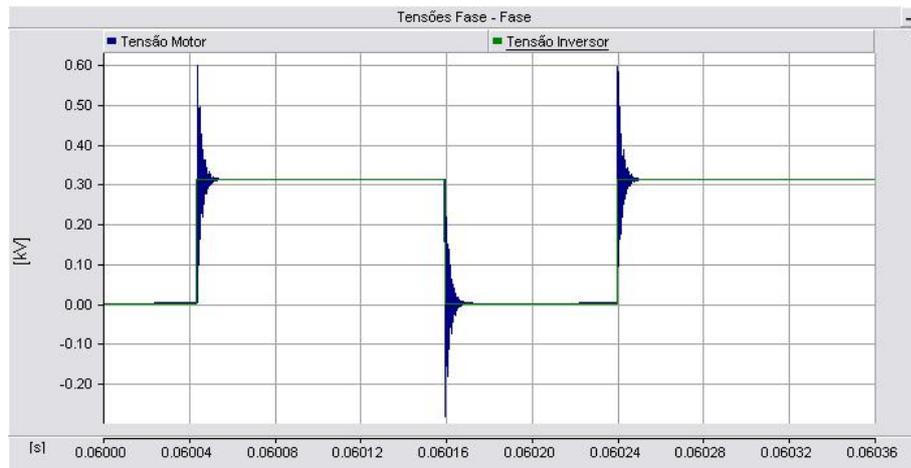


Figura 4.8: Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 20m e sem filtro. Tensões entre fases na saída do inversor e nos terminais do motor.

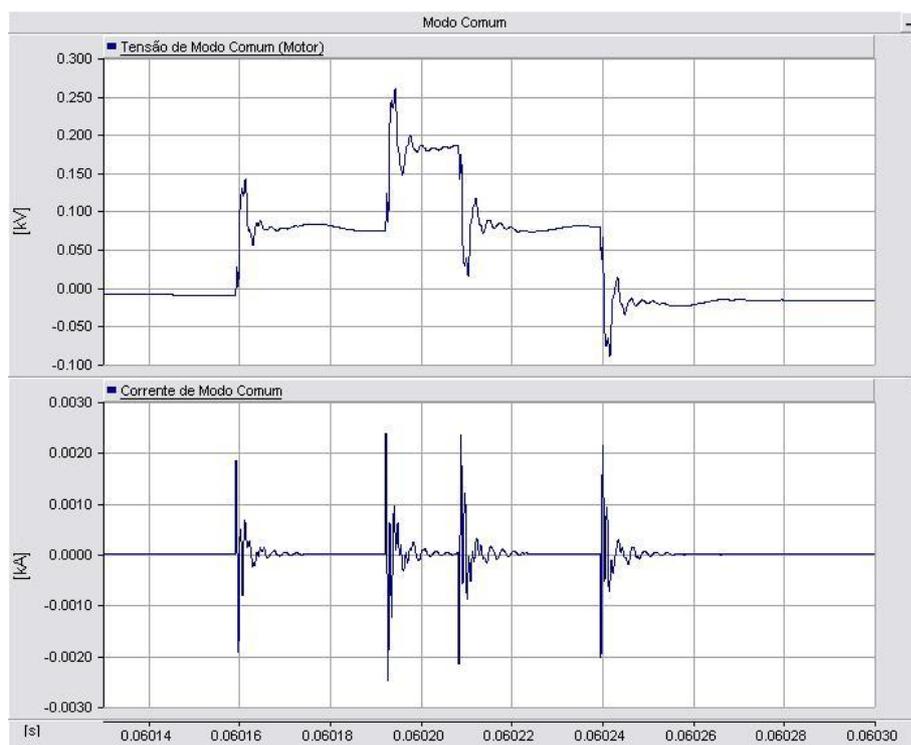


Figura 4.9: Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 20m e sem filtro. Tensão de modo comum nos terminais do motor e corrente de modo comum.

Ao se acoplar o filtro dv/dt ao barramento de corrente contínua, pretende-se atuar mais precisamente no modo comum ao desviar a corrente de modo comum para o barramento. Ao analisar a (Fig. 4.17), percebe-se a atenuação das oscilações na tensão de modo comum e diminuição dos picos de corrente de modo comum em maior grau do que as apresentadas

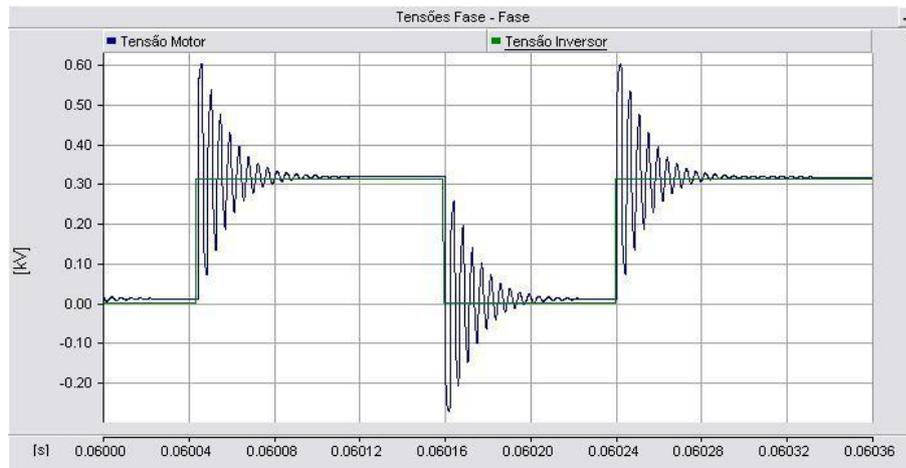


Figura 4.10: Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 100m e sem filtro. Tensões entre fases na saída do inversor e nos terminais do motor.

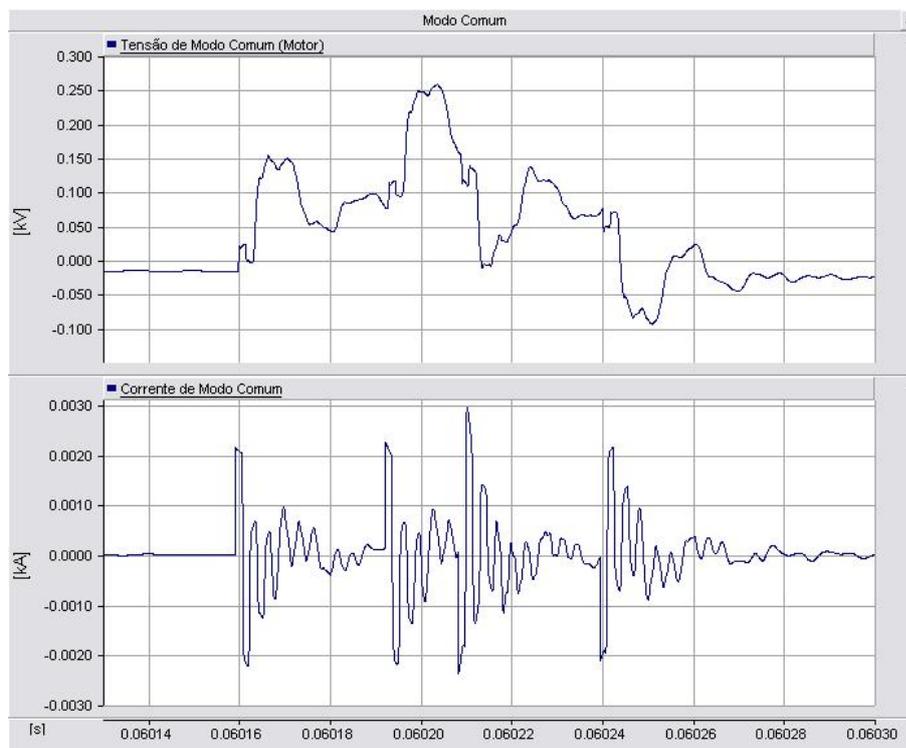


Figura 4.11: Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 100m e sem filtro. Tensão de modo comum nos terminais do motor e corrente de modo comum.

pele filtro dv/dt , apresentando resultados mais favoráveis. Para o sistema com cabo de 100 m (Fig. 4.19) observa-se uma ligeira atenuação das oscilações da tensão de modo comum e considerável redução no valor de pico das correntes de modo comum e em suas oscilações.

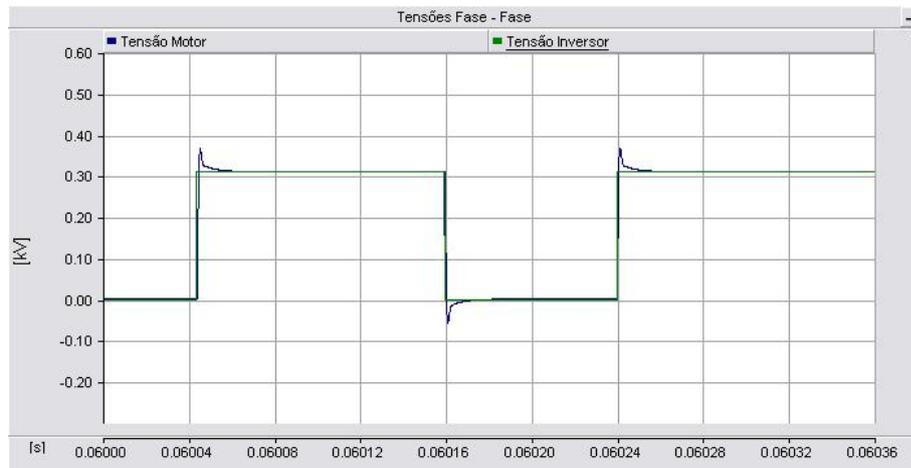


Figura 4.12: Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 20m e filtro dv/dt. Tensões entre fases na saída do inversor e nos terminais do motor.

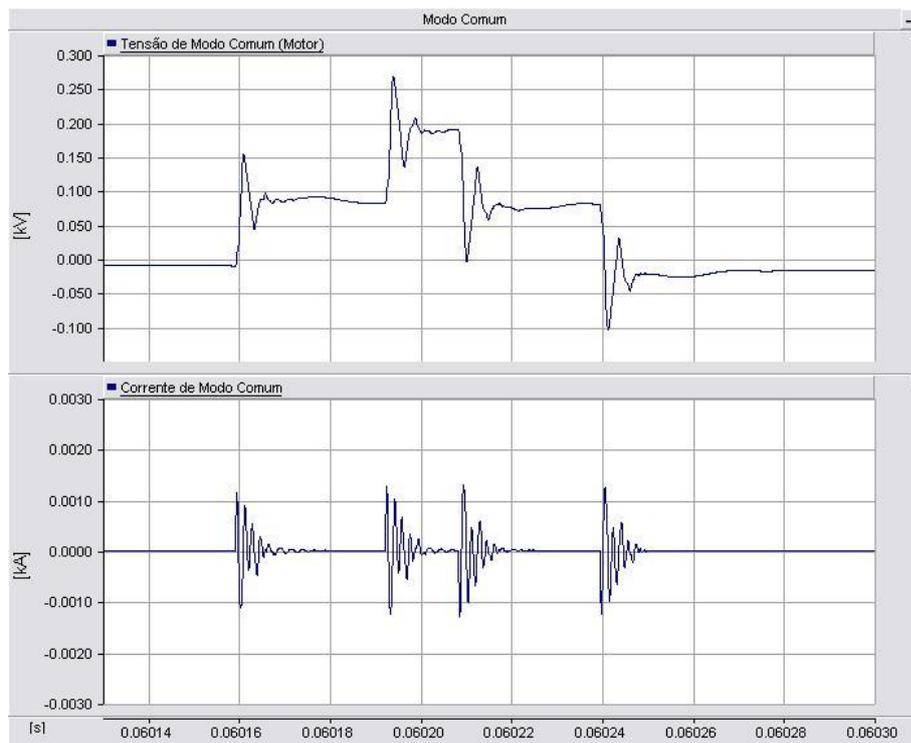


Figura 4.13: Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 20m e filtro dv/dt. Tensão de modo comum nos terminais do motor e corrente de modo comum

Não há maior redução das sobretensões transitórias (Figs. 4.16 e 4.18), além das já obtidas pelo filtro dv/dt. Isto acontece pois o acoplamento atua exclusivamente nos fenômenos de modo comum.

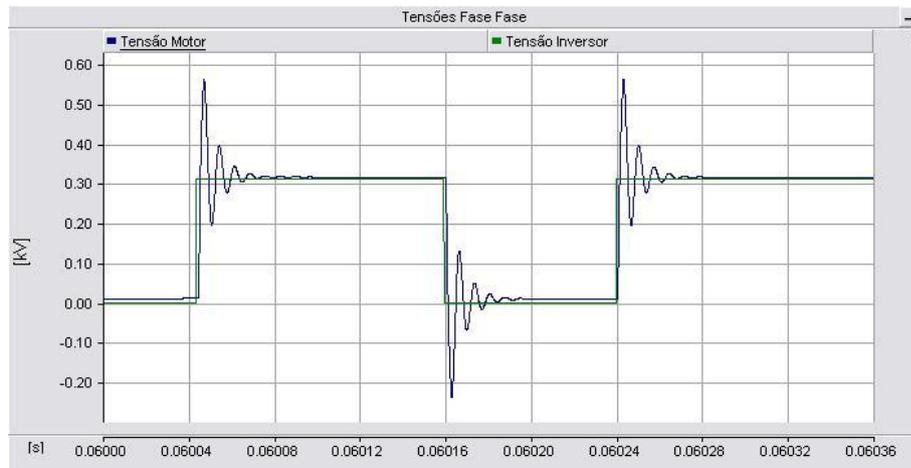


Figura 4.14: Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 100m e filtro dv/dt. Tensões entre fases na saída do inversor e nos terminais do motor.

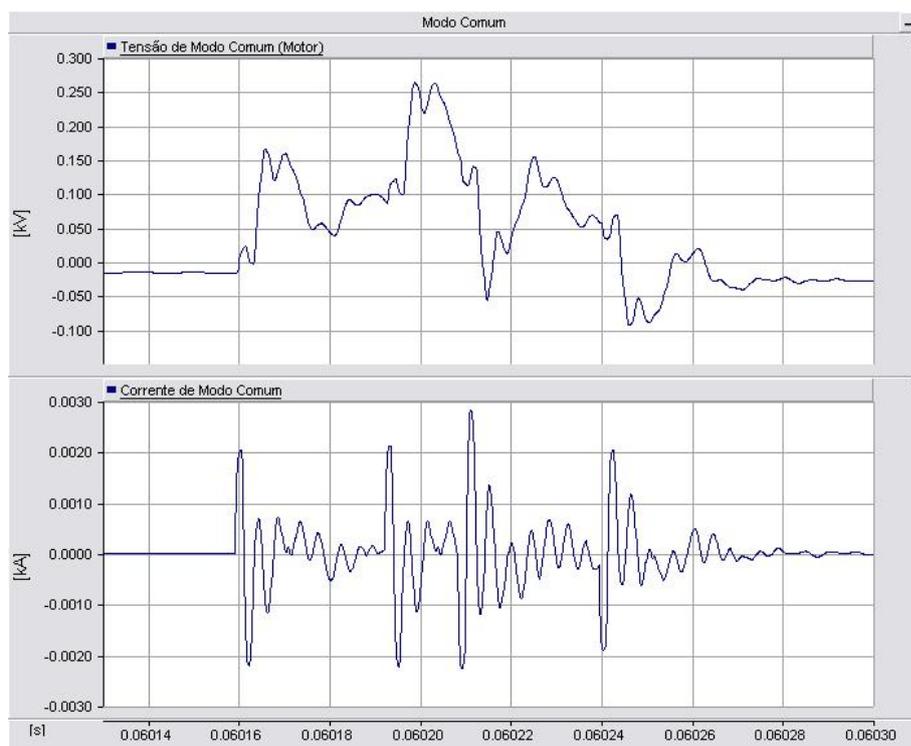


Figura 4.15: Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 100m e filtro dv/dt. Tensão de modo comum nos terminais do motor e corrente de modo comum.

Nem sempre é fácil encontrar a conexão ao ponto médio do barramento de corrente contínua disponível, de forma que alguns modelos encontrados na literatura sugerem outras opções de conexão, como, por exemplo, o filtro acoplado aos pontos negativo e positivo do barramento de corrente contínua. Esta configuração de filtro obteve bons resultados

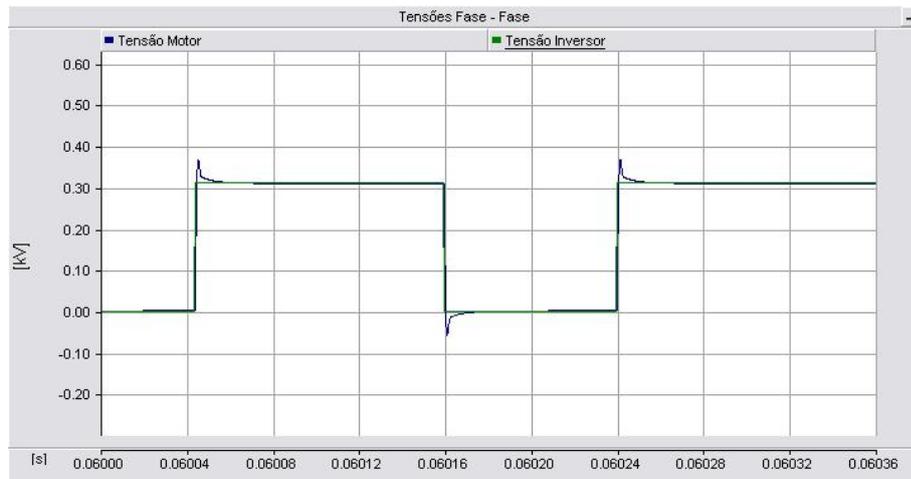


Figura 4.16: Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 20m e filtro acoplado ao barramento. Tensões entre fases na saída do inversor e nos terminais do motor.

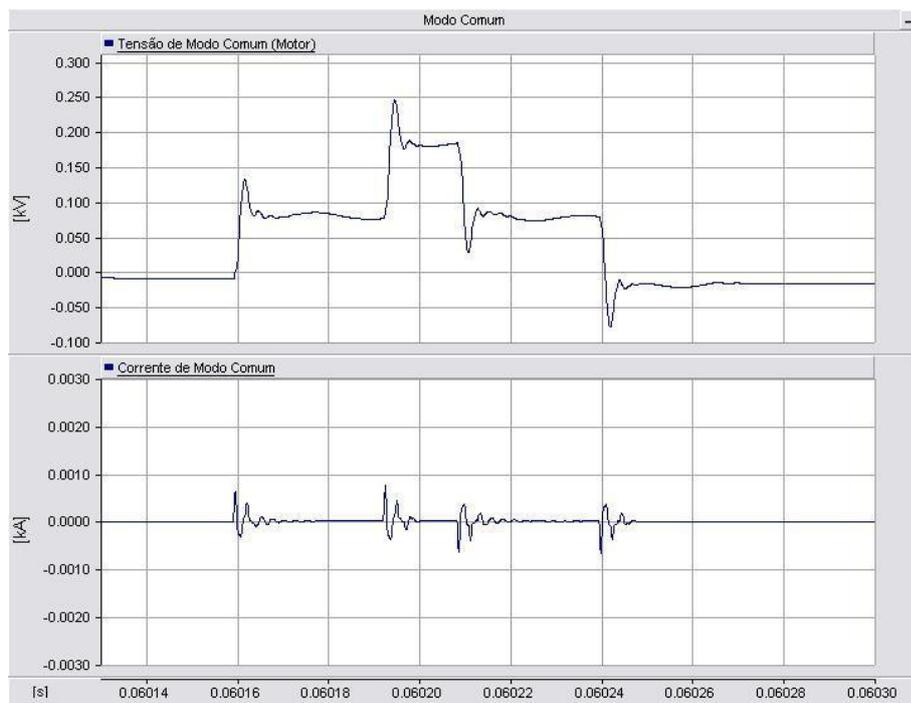


Figura 4.17: Resultados de simulação para sistema com cabo de 20m e filtro acoplado ao barramento. Tensão de modo comum nos terminais do motor e corrente de modo comum.

tanto para atenuação das sobretensões transitórias quanto para as grandezas de modo comum. Para ambos sistemas, a redução das sobretensões transitórias alcançou o mesmo resultado que os filtros dv/dt e o filtro acoplado ao barramento de corrente contínua, como se pode observar em (Fig. 4.20) e (Fig 4.22). Este resultado é esperado, pois a impedância

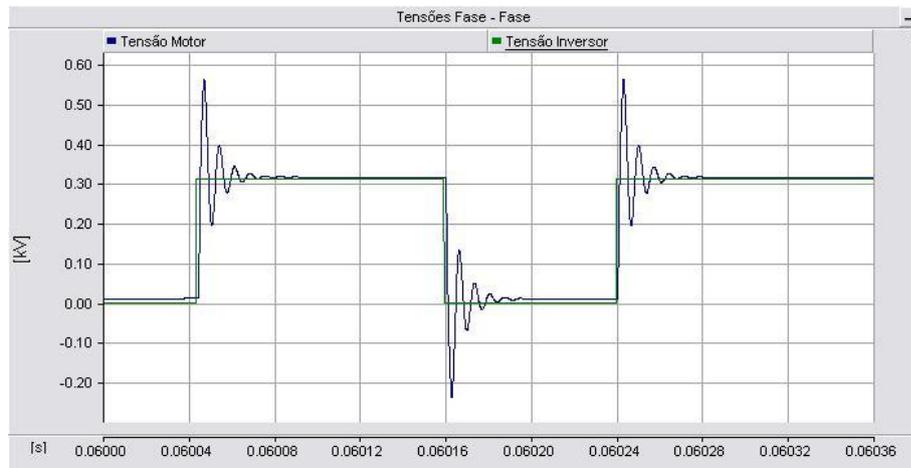


Figura 4.18: Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 100m e filtro acoplado ao barramento. Tensões entre fases na saída do inversor e nos terminais do motor.

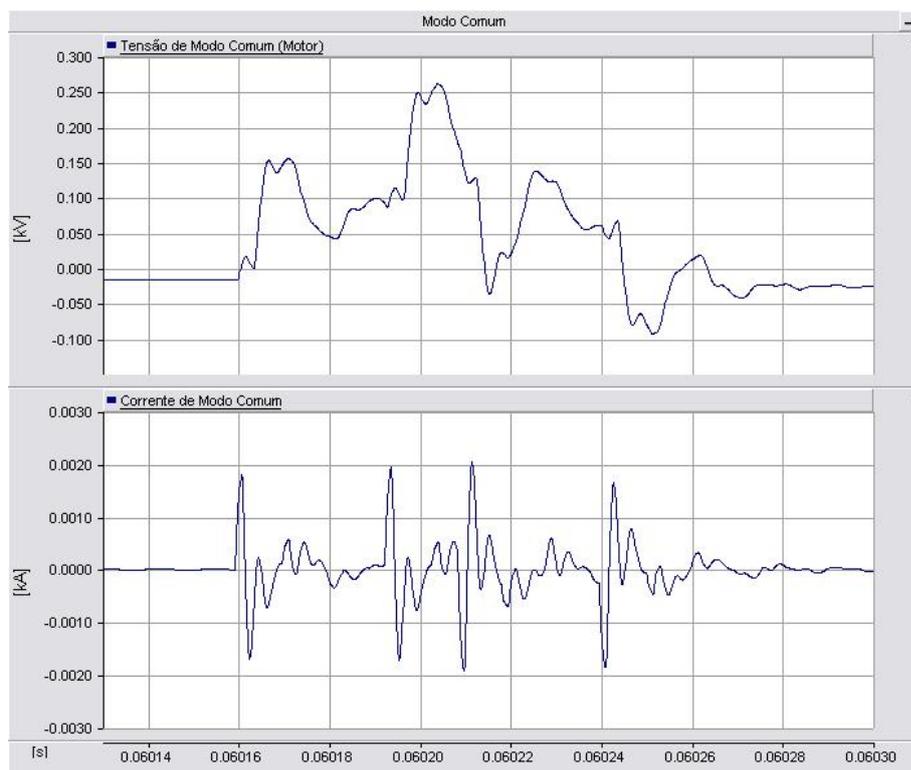


Figura 4.19: Resultados de simulação para sistema com cabo de 100m e filtro acoplado ao barramento. Tensão de modo comum nos terminais do motor e corrente de modo comum.

equivalente da rede dupla deve ter o mesmo valor que a impedância equivalente da rede simples e as conexões com o barramento interferem somente nos fenômenos de modo comum.

Para o modo comum houve grande atenuação das oscilações e redução de pico da corrente de modo comum para o sistema com 20 m de cabo (Fig. 4.21) e para o sistema com cabo de 100m (Fig. 4.23). Entre tanto, estes resultados, também são bem próximos aos encontrados pelo filtro acoplado ao barramento de corrente contínua, pelos mesmos motivos expostos anteriormente. Esta configuração se apresenta como uma alternativa para acionamentos onde o neutro do barramento de corrente contínua não está disponível.

Porém, a atenuação mais efetiva do modo comum é alcançada com a inserção do indutor de modo comum que cria uma alta impedância para a corrente de modo comum, conforme explicado anteriormente. E é o que se pode observar nos resultados de simulação, onde pode-se observar as maiores reduções nas oscilações da tensão e da corrente de modo comum bem como seus respectivos valores de pico (Figs. 4.25 e 4.27) quando comparadas às outras topologias analisadas.

As sobretensões apresentam resultados semelhantes aos obtidos com o filtro dv/dt (Figs. 4.24 e 4.26), visto que o indutor de modo comum é "invisível" aos fenômenos de modo diferencial.

De maneira geral, o que se pode concluir é que, dentre as topologias analisadas, a que apresentou maior redução para sobretensão e fenômenos de modo comum, de forma conjunta, foi o filtro com indutor de modo comum, apresentando melhor redução para os fenômenos de modo comum. Embora, em primeira análise, possa parecer que tal topologia pode apresentar perdas mais elevadas que os filtros estudados, há de se considerar a efetividade e benefícios alcançados quando da implementação. Um levantamento simplificado do desempenho das topologias pode ser observado em Tabela: 4.2.

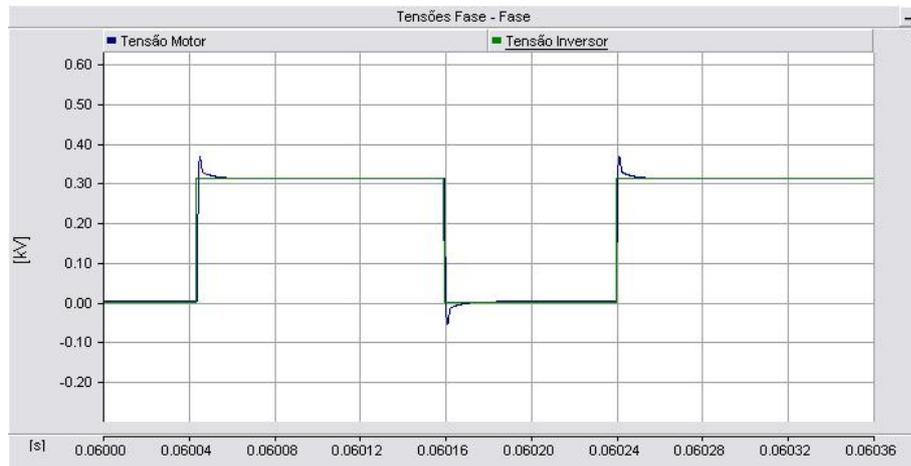


Figura 4.20: Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 20m e filtro acoplado aos pontos negativo e positivo do barramento. Tensões entre fases na saída do inversor e nos terminais do motor.

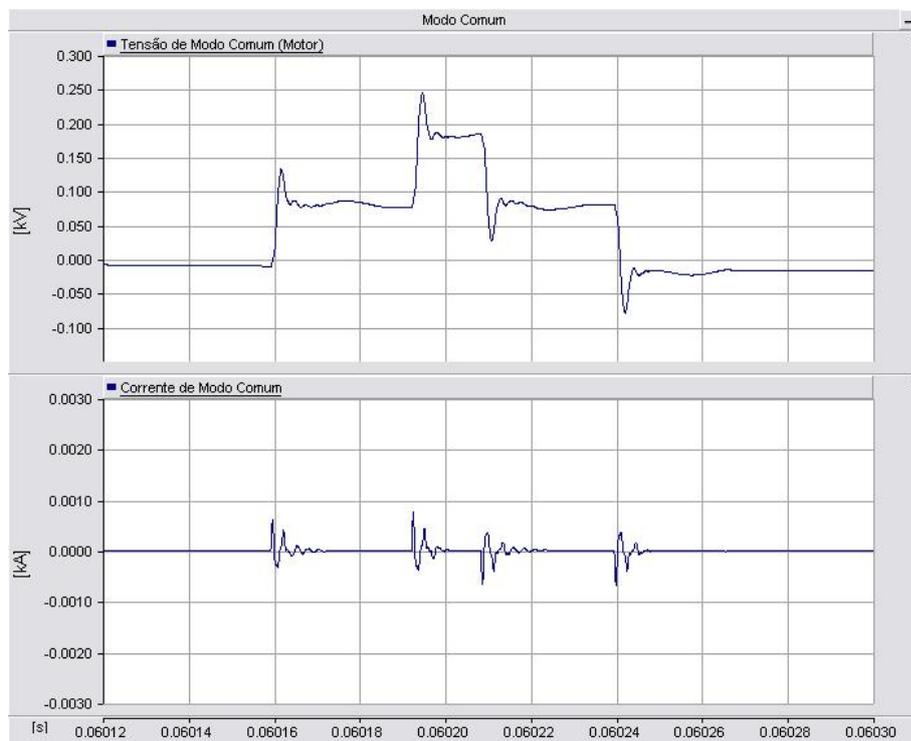


Figura 4.21: Resultados de simulação para sistema com cabo de 20m e filtro acoplado aos pontos negativo e positivo do barramento. Tensão de modo comum nos terminais do motor e corrente de modo comum.

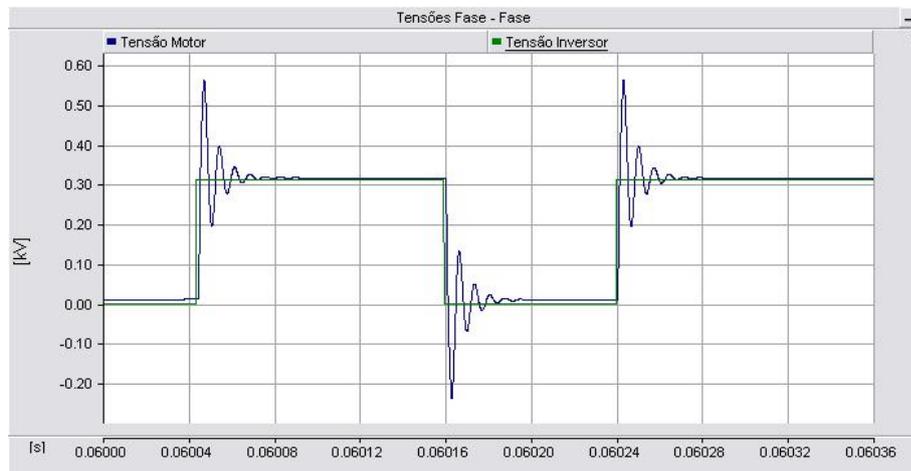


Figura 4.22: Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 100m e filtro acoplado aos pontos negativo e positivo do barramento. Tensões entre fases na saída do inversor e nos terminais do motor.

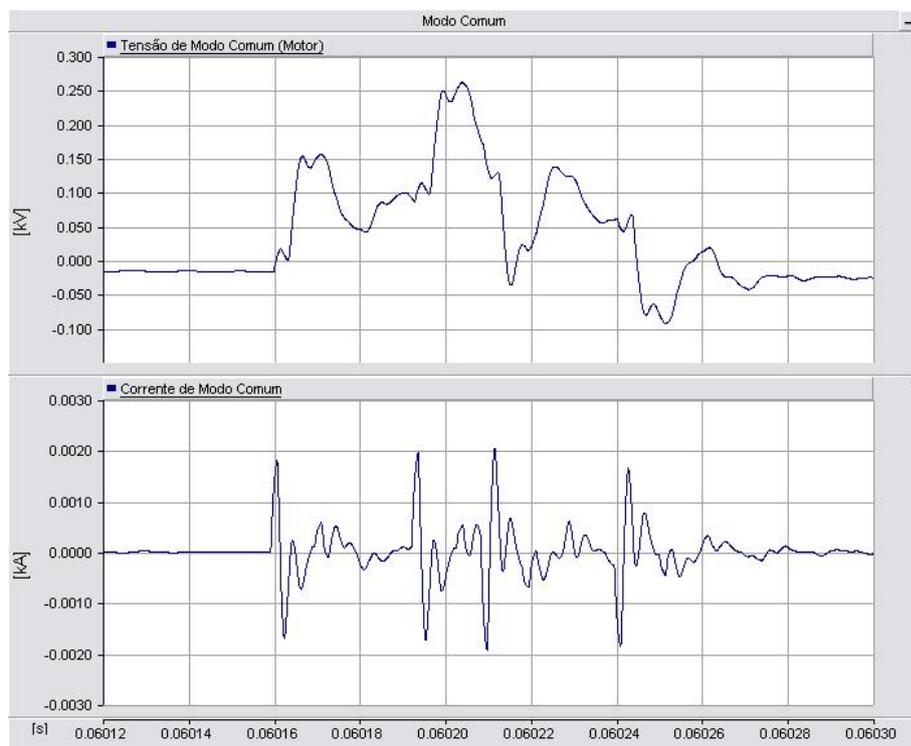


Figura 4.23: Resultados de simulação para sistema com cabo de 100m e filtro acoplado aos pontos negativo e positivo do barramento. Tensão de modo comum nos terminais do motor e corrente de modo comum.

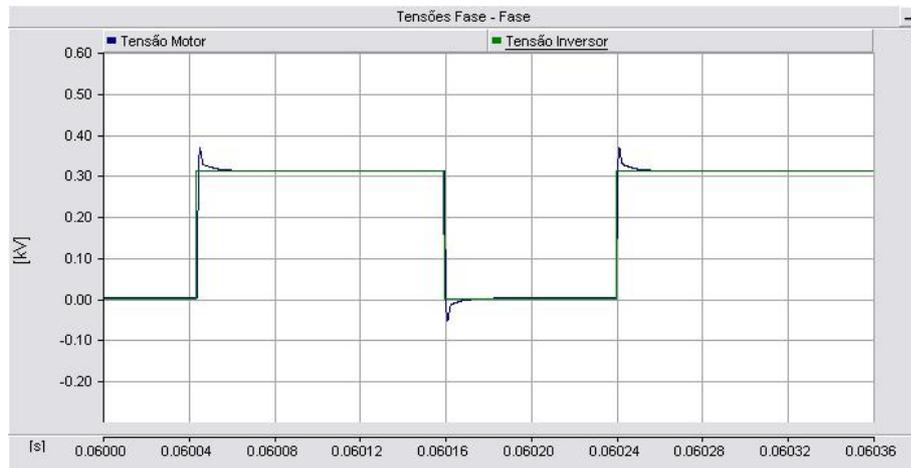


Figura 4.24: Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 20m, filtro acoplado e indutor de Modo Comum. Tensões entre fases na saída do inversor e nos terminais do motor.

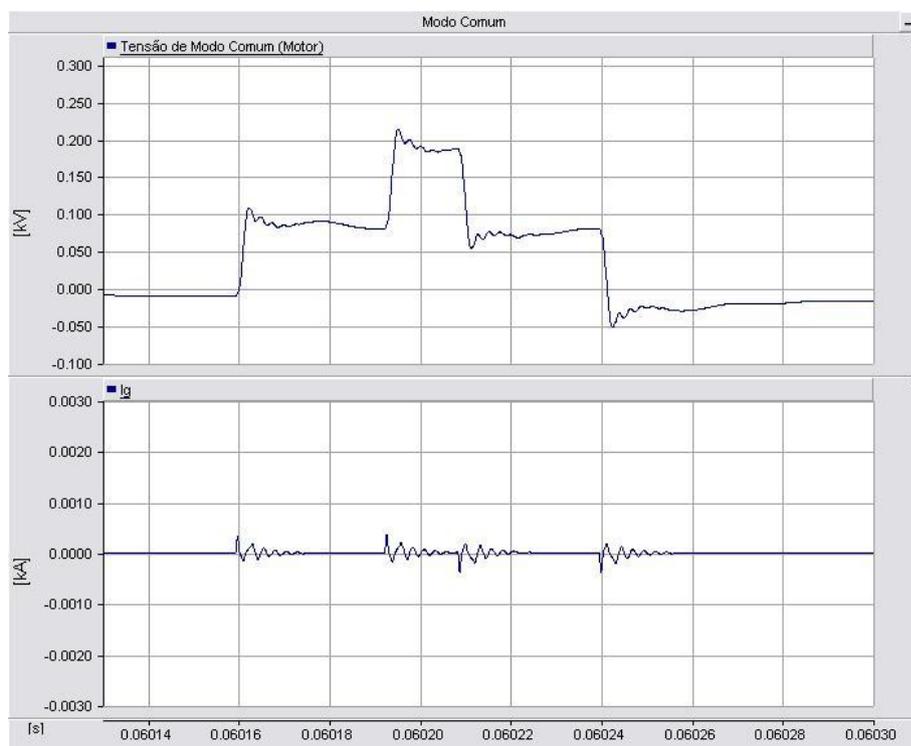


Figura 4.25: Resultados de simulação para sistema com cabo de 20m, filtro acoplado e indutor de Modo Comum. Tensão de modo comum nos terminais do motor e corrente de modo comum.

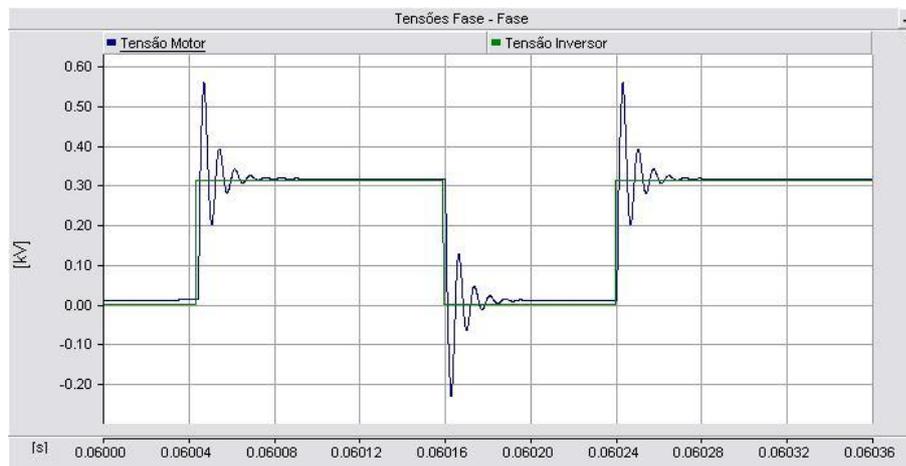


Figura 4.26: Resultados de simulação para sistema de acionamento com cabo de 100m, filtro acoplado e indutor de Modo Comum. Tensões entre fases na saída do inversor e nos terminais do motor.

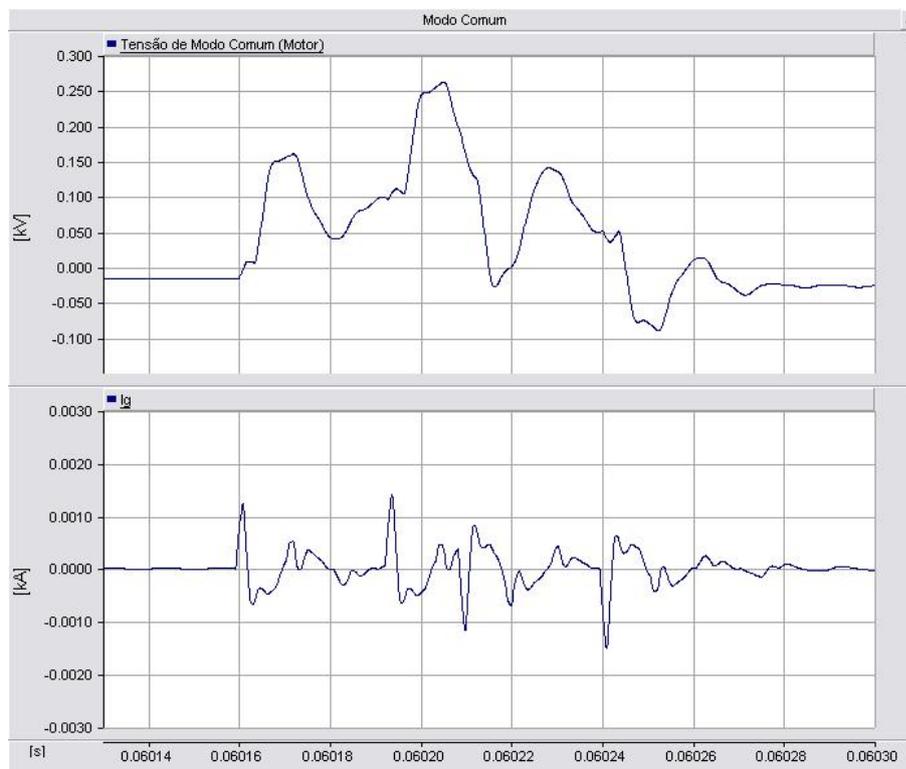


Figura 4.27: Resultados de simulação para sistema com cabo de 100m, filtro acoplado e indutor de Modo Comum. Tensão de modo comum nos terminais do motor e corrente de modo comum.

Tabela 4.2: Comparação entre Topologias de Filtros para Modo Diferencial e Modo Comum segundo resultados observados na simulação

Topologias Implementadas								
Fenômenos	1		2		3		4	
Tipos de Cabos	20m	100m	20m	100m	20m	100m	20m	100m
Sobretensão	++	++	++	++	++	++	++	++
Tensão de Modo Comum	-	-	+	+	+	+	++	++
Corrente de Modo Comum	-	-	+	+	+	+	++	++

Legenda: -Pouco Efetivo, +Efetivo, ++Muito Efetivo.

1- Filtro dv/dt 2- Filtro dv/dt acoplado ao barramento de corrente contínua. 3- Filtro ligado aos pontos positivo e negativo do barramento de corrente contínua. 4- Filtro dv/dt com indutor de modo comum e acoplado ao barramento de corrente contínua.

4.3 Conclusões

Este capítulo apresenta todo o desenvolvimento da modelagem de um sistema de acionamento de motor de indução no programa PSCAD/EMTDC[©], com representação do inversor, cabo e motor. Este modelo permite analisar os fenômenos de sobretensão nos terminais do motor e de circulação de correntes de modo comum. Na mesma plataforma, foram analisadas topologias de filtro que buscam mitigar tais problemas e tiveram seus desempenhos comparados quando da capacidade de atenuação da sobretensão e da circulação de correntes de modo comum. Os resultados de simulação foram comparados resultando em uma tabela de levantamento de desempenho das topologias.

Resultados de simulação foram apresentados para um sistema de acionamento de baixa tensão.

O modelo de simulação desenvolvido configura-se numa plataforma viável e prática para análise dos fenômenos de alta frequência presentes no sistema de acionamento para diferentes configurações do sistema, como diferentes comprimentos de cabos, bem como análise de técnicas de solução.

Entretanto há que se considerar algumas limitações apresentadas pelo modelo computacional de simulação, como:

- A precisão dos resultados de simulação diminui com o aumento do comprimento do cabo. Há que se analisar a integração entre os elementos do sistema para avaliação mais aprofundada dos reais motivos da obtenção de tais resultados; visto que, em trabalhos anteriores, quando não se utilizou o modelo do motor presente na biblioteca do sistema, e também não se utilizou o inversor para modelar os pulsos, foram alcançados resultados mais apropriados [38].

- Há que se considerar que para que o sistema atinja regime permanente de operação é necessário um grande número de simulações visto que o passo de integração adotado deve ser pequeno para visualização dos fenômenos estudados.

Melhorias podem ser alcançadas mediante implementação do modelo para cabos específicos para sistemas de acionamento desenvolvido em trabalho anterior, embora este tenha sido desenvolvido para análise no domínio modal. [38].

Quanto aos problemas relacionados ao processo de simulação, o que se pode sugerir é a otimização do método empregado para simulação através da ferramenta de simulações múltiplas presente no programa.

Capítulo 5

Resultados Experimentais

5.1 Considerações Iniciais

A comparação dos resultados de simulação computacional obtidos no capítulo anterior com os resultados obtidos de medições experimentais são importantes para a verificação da confiabilidade do modelo em representar o comportamento dinâmico do sistema real e configurá-lo como ferramenta de análise dos fenômenos de modo diferencial e de modo comum e concluir que a utilização deste modelo possa ser feita em benefício de formas empíricas na busca por soluções.

5.2 Apresentação dos Resultados

Neste item, os resultados obtidos de medidas experimentais para o sistema sem filtro e para o sistema com filtro dv/dt são apresentados, para os diferentes comprimentos de cabos utilizados na simulação. A implementação experimental de algumas das topologias de filtros para modo comum exigem neutro do barramento de corrente contínua disponível. Esta não é uma característica construtiva muito comum em inversores disponíveis comercialmente. Encontra-se em desenvolvimento no LAI (Laboratório de Aplicações Industriais) um estudo que viabilize a implementação destas topologias de filtros em trabalhos futuros.

O sistema sem filtro apresentou tanto altos valores de sobretensão transitória (Figs.

5.1 e 5.3), quanto dos fenômenos de modo comum. Enquanto que para ambos os sistemas as sobretensões transitórias atingiram valores de pico de aproximadamente 590 V, para as correntes de modo comum o sistema com cabo de 20 m apresentou valores de pico de aproximadamente 2.8A (Fig. 5.2) e o sistema com cabo de 100 m apresentou valores de pico de aproximadamente 3 A (Fig. 5.4), consideravelmente próximos aos resultados obtidos na simulação. As atenuações nas oscilações das grandezas analisadas observadas para diferentes comprimentos de cabos também estão presentes de forma semelhante nos resultados experimentais.

Para o sistema com filtro dv/dt , resultados diferentes foram observados para os diferentes comprimentos de cabo. Para o sistema com cabo de 20 m o valor de pico da sobretensão transitória foi reduzido para a proximadamente 350 V (Fig. 5.5), enquanto que para o sistema com cabo de 100 m a sobretensão foi reduzida para 455 V aproximadamente (Fig. 5.7). Conforme mencionado anteriormente, na análise dos resultados experimentais, isso acontece porque o filtro foi projetado considerando-se o sistema com cabo de 20 m, porém capaz de apresentar resultados consideráveis para uma grande variedade de comprimentos de cabo.

Nos fenômenos de modo comum são observados resultados satisfatórios apenas para as correntes de modo comum, para ambos os comprimentos de cabo. O sistema com cabo de 20 m apresentou redução do valor de pico da corrente de modo comum para 1 A (Fig. 5.6), enquanto que o sistema com cabo de 100 m apresentou redução para 2 A (Fig. 5.8). Tais resultados mostraram-se bastante próximos aos obtidos nos resultados de simulação (isto acontece, pois houve redução do dv/dt de modo comum), ligeiramente menores entretanto, o que pode ser explicado devido à simplicidade de representação de todas as impedâncias presentes no aterramento do sistema de simulação.

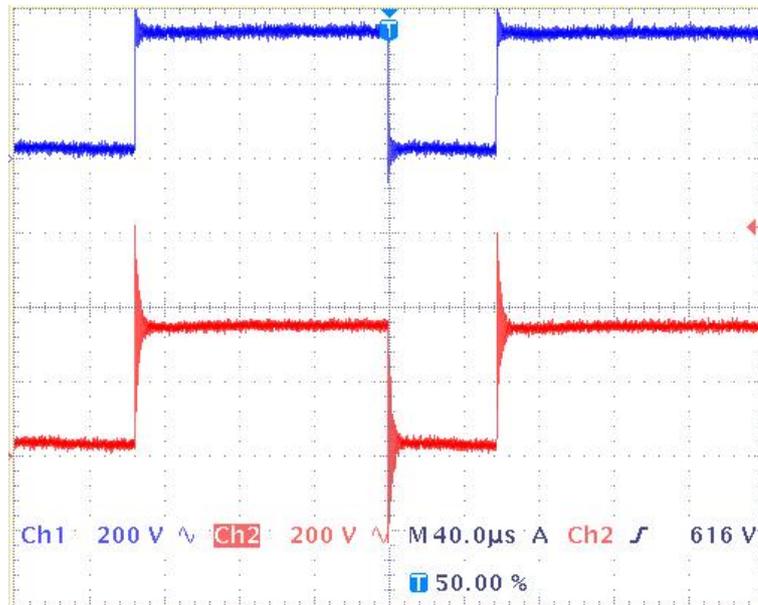


Figura 5.1: Sobretensão - Sistema sem filtro - cabo 20m. Tensões medidas na saída do inversor e nos terminais de entrada do motor, respectivamente.

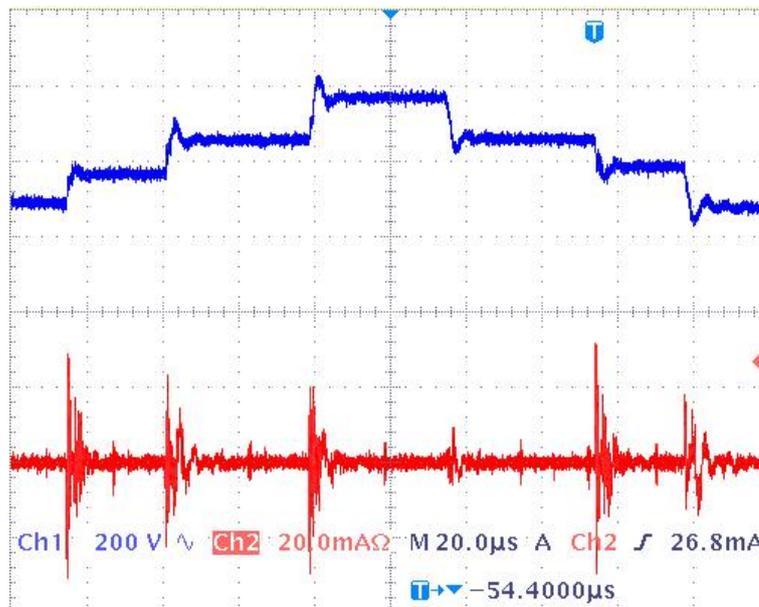


Figura 5.2: Tensão e Corrente de Modo Comum, respectivamente - Sistema sem filtro - cabo 20m. Escala de corrente: 2A por divisão

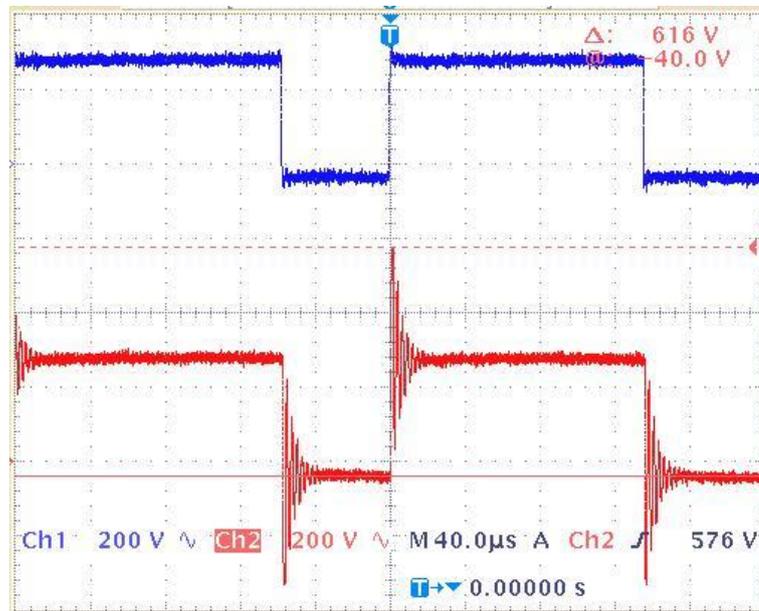


Figura 5.3: Sobretensão - Sistema sem filtro - cabo 100m. Tensões medidas na saída do inversor e nos terminais de entrada do motor, respectivamente.

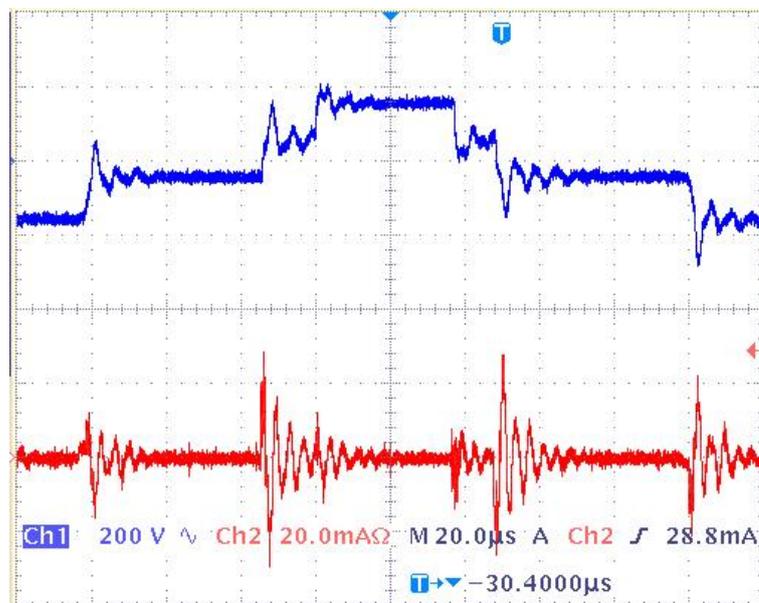


Figura 5.4: Tensão e Corrente de Modo Comum, respectivamente - Sistema sem filtro - cabo 100m. Escala de corrente: 2A por divisão

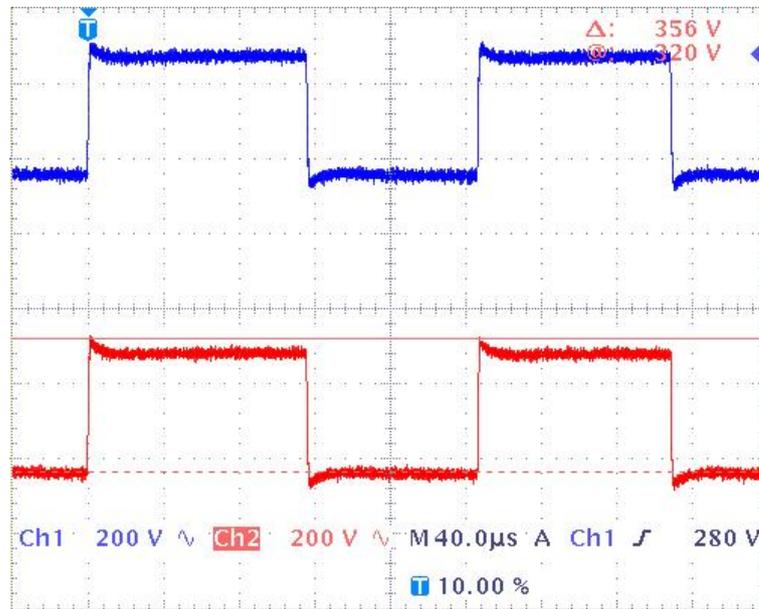


Figura 5.5: Sobretensão - Sistema com filtro - cabo 20m. Tensões medidas na saída do inversor e na entrada do motor, respectivamente.

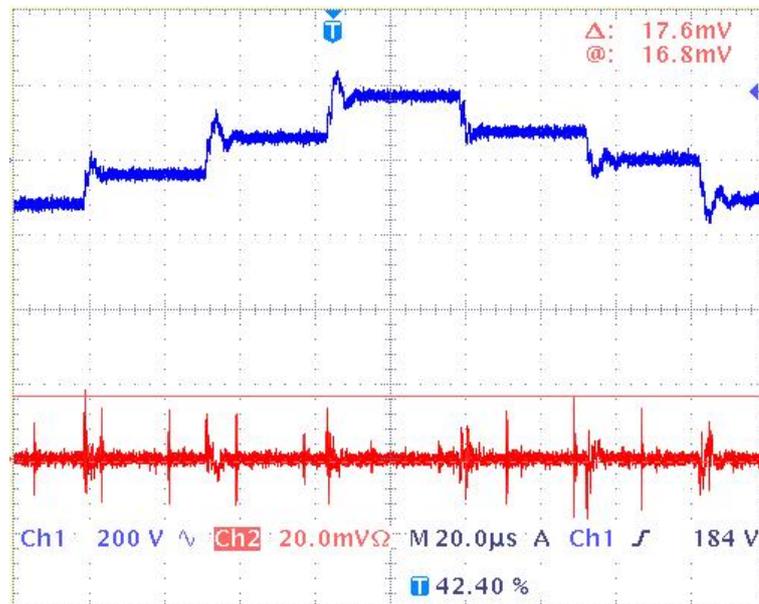


Figura 5.6: Tensão e Corrente de Modo Comum - Sistema com filtro - cabo 20m - Escala 2A por divisão

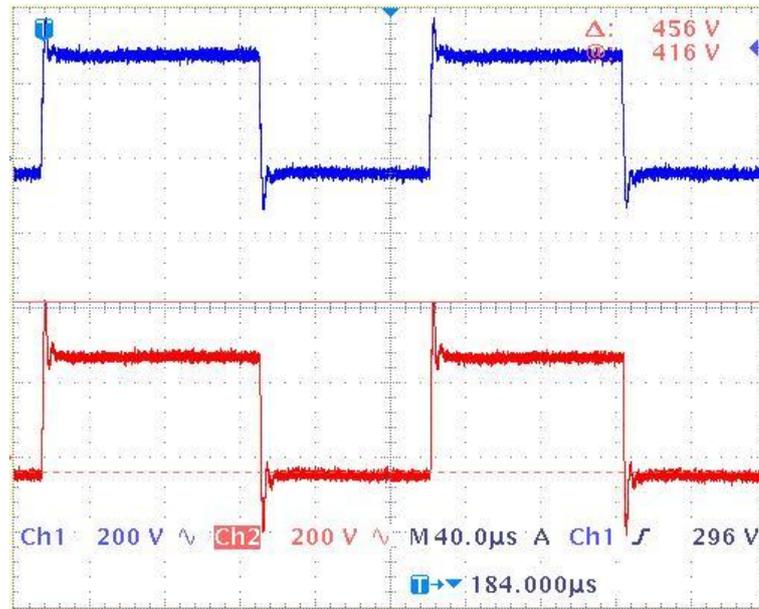


Figura 5.7: Sobretensão - Sistema com filtro - cabo 100m. Tensões medidas na saída do inversor e na entrada do motor, respectivamente.

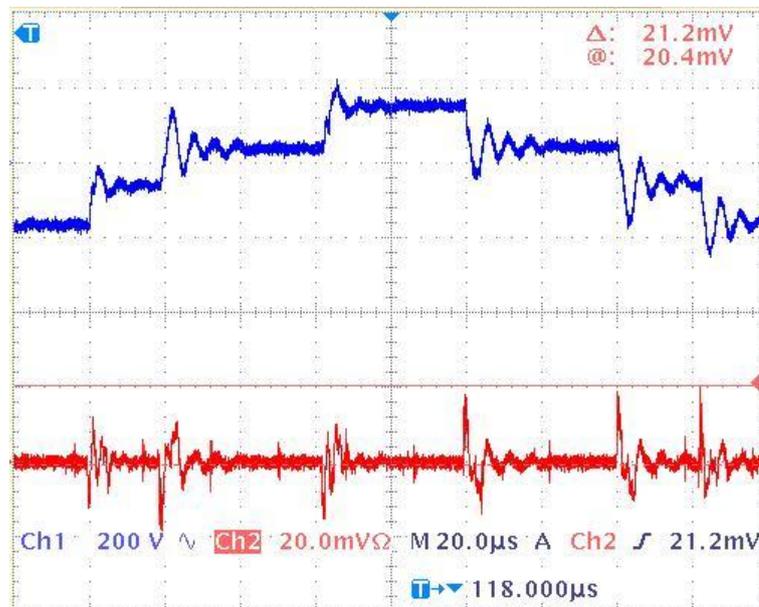


Figura 5.8: Tensão e Corrente de Modo Comum - Sistema com filtro - cabo 100m - Escala 2A por divisão

Uma melhor visualização dos resultados experimentais pode ser realizada através dos gráficos plotados no programa Matlab[®], onde os dados das medidas experimentais foram inseridos.

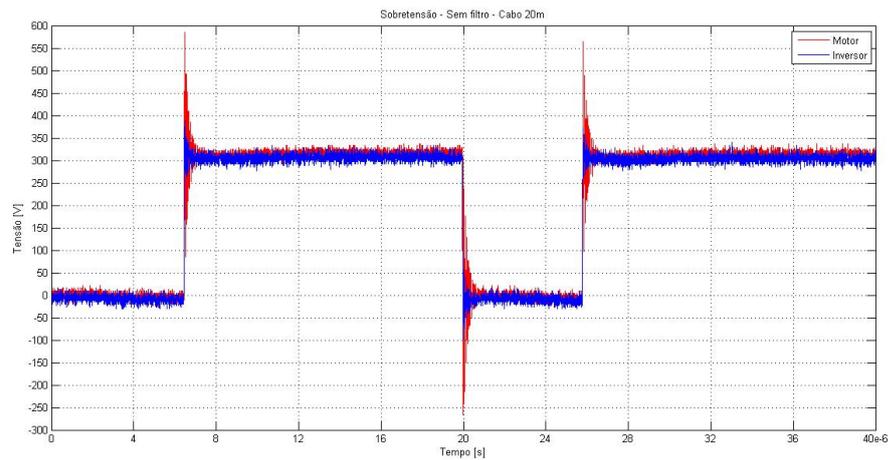


Figura 5.9: Sobretensão - Sistema sem filtro - cabo 20m. Tensões medidas na saída do inversor e na entrada do motor, respectivamente.

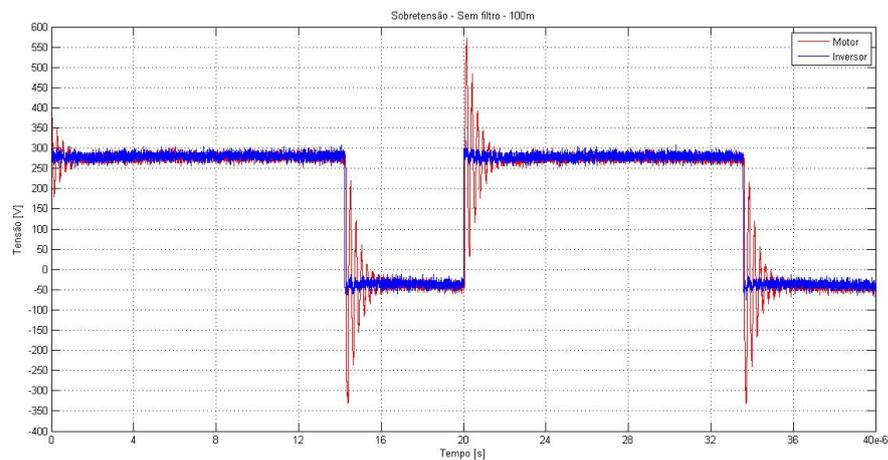


Figura 5.10: Sobretensão - Sistema sem filtro - cabo 100m. Tensões medidas na saída do inversor e na entrada do motor, respectivamente.

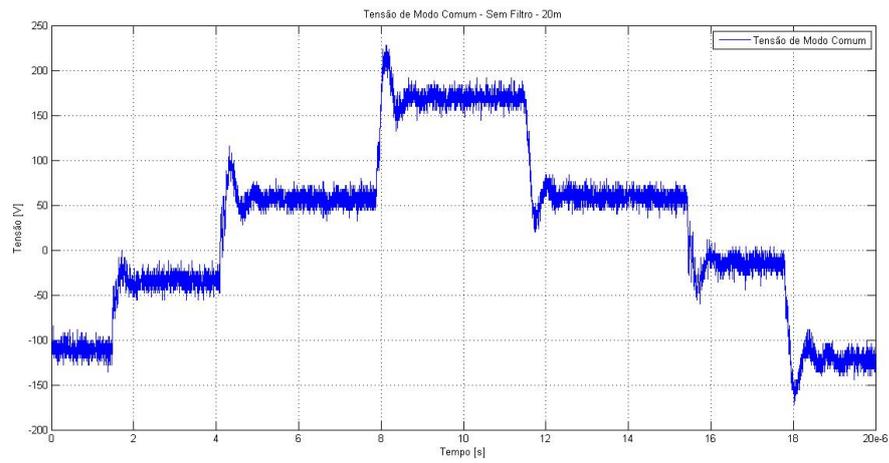


Figura 5.11: Tensão de Modo Comum - Sistema sem filtro - cabo 20m.

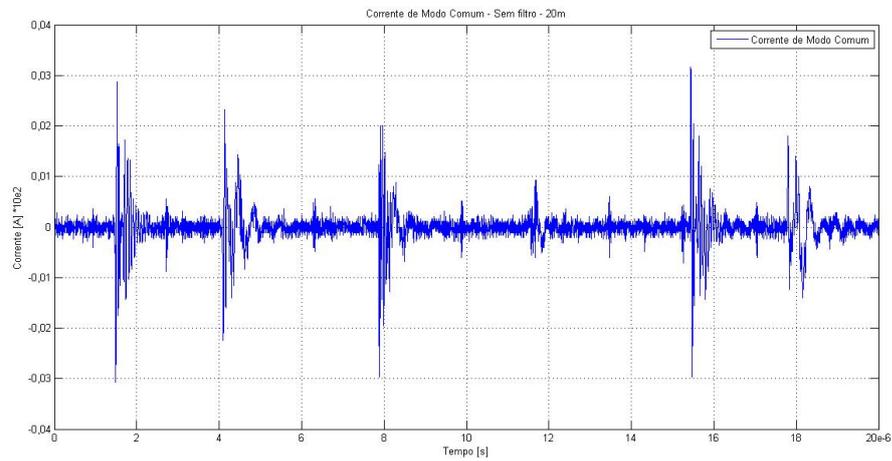


Figura 5.12: Corrente de Modo Comum - Sistema sem filtro - cabo 20m.

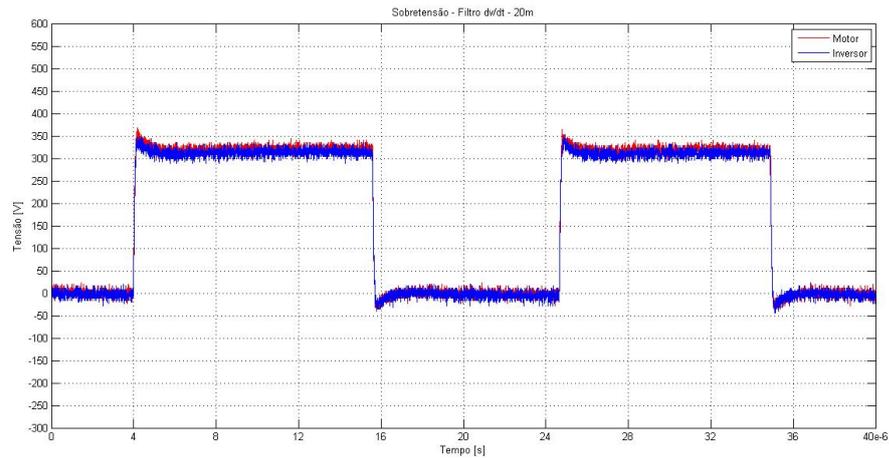


Figura 5.13: Sobretensão - Sistema filtro dv/dt - cabo 20m. Tensões medidas na saída do inversor e na entrada do motor, respectivamente.

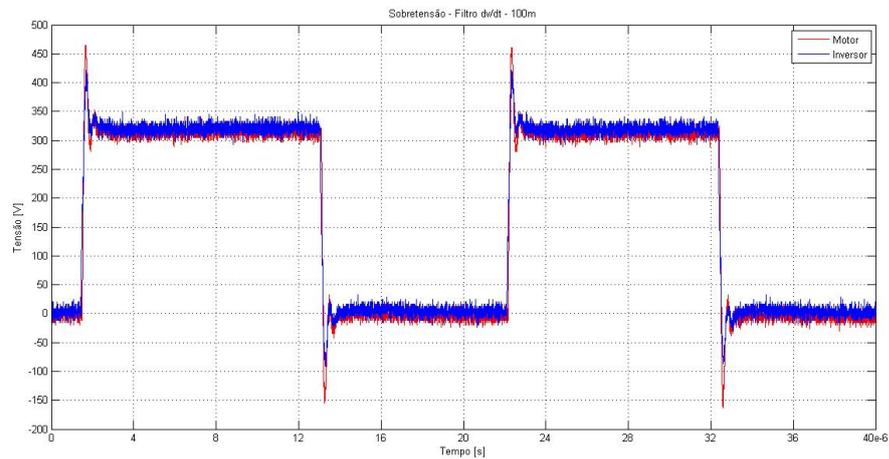


Figura 5.14: Sobretensão - Sistema filtro dv/dt - cabo 100m. Tensões medidas na saída do inversor e na entrada do motor, respectivamente.

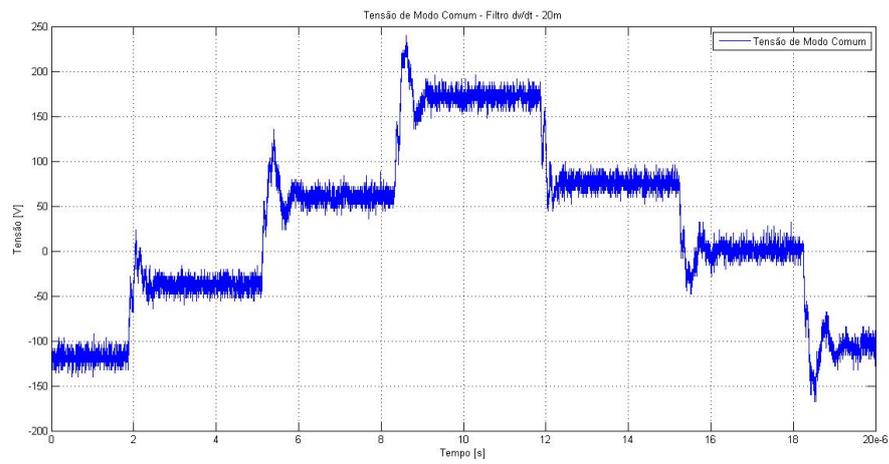


Figura 5.15: Tensão de Modo Comum - Sistema filtro dv/dt - cabo 20m.

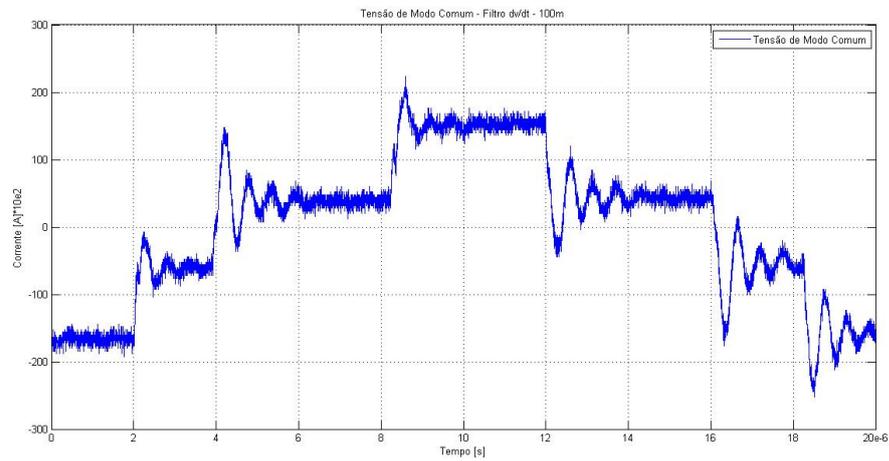


Figura 5.16: Tensão de Modo Comum - Sistema filtro dv/dt - cabo 100m.

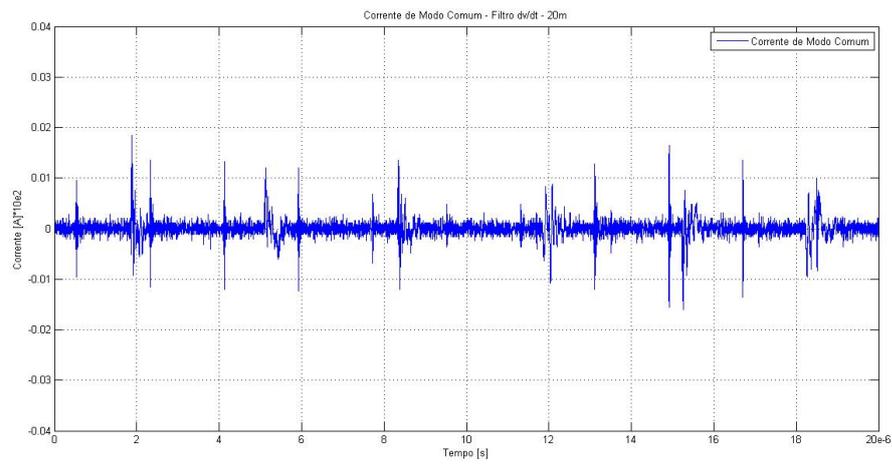


Figura 5.17: Corrente de Modo Comum - Sistema filtro dv/dt - cabo 20m.

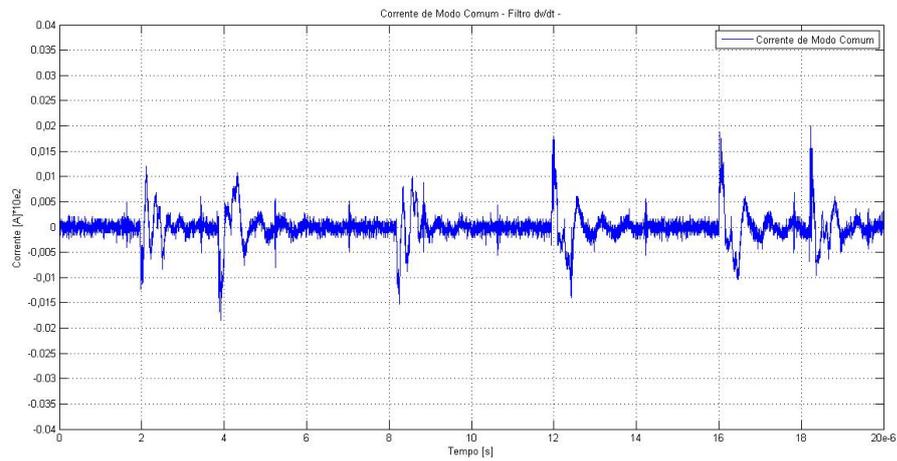


Figura 5.18: Corrente de Modo Comum - Sistema filtro dv/dt - cabo 100m.

5.3 Conclusões

Desde que surgiram problemas provenientes do uso de inversores com altas frequências de chaveamento e dispositivos IGBTs como semicondutores, houve a necessidade de modelos para simulação que primem pela precisa representação do sistema na procura de soluções de forma não empírica, economizando em tempo e custo no teste de filtros.

Neste contexto, o modelo utilizado neste trabalho representou de forma bem próxima o sistema real e alguns dos seus principais componentes, tendo sido comprovado através comparações entre os resultados obtidos nas simulações e nas medições que o mesmo é realmente eficaz para análise dos fenômenos de modo diferencial e de modo comum. As simulações foram realizadas no domínio das fases, com parâmetros do cabo distribuídos e dependentes da frequência e ainda implementação de modelo de impedância de entrada do motor de forma a caracterizar o comportamento do sistema em altas frequências.

Utilizando-se a plataforma computacional elaborada, foi possível analisar-se as sobretensões transitórias, tensão de modo comum e circulação de correntes de modo comum, simultaneamente, permitindo a implementação de diferentes tipos de filtros que têm como objetivo a atenuação destes fenômenos, mostrando-se como uma opção adicional para desenvolvimento, estudo e melhoria deste dispositivos.

As principais diferenças observadas entre os modelos de simulação e o sistema real foram valores de pico das grandezas observadas e formas de ondas para sistemas com cabos de comprimento longo. São limitações devido às simplificações adotadas na modelagem do sistema, tempo do sistema de simulação para atingir o regime permanente e integração de determinados componentes do sistema.

Como comentário final, ressalra-se que a elaboração de tal plataforma computacional

vem a contribuir no estudo dos problemas de alta frequência presentes nos sistemas de acionamento baseados em conversores de frequência.

Capítulo 6

Conclusão

A utilização de dispositivos semicondutores do tipo IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) aliado a técnicas de modulação por largura de pulso para acionamento de motores elétricos, permitiu a operação com frequências de chaveamento elevadas e rápidos tempos de subida dos pulsos de tensão de saída do inversor, resultando em problemas no sistema no tocante a fenômenos indesejáveis de alta frequência. As rápidas variações de tensão em relação ao tempo (dv/dt 's) podem causar sobretensões nos terminais do motor, circulação de correntes de alta frequência pela rede de aterramento e consequentes problemas de interferência eletromagnética, dentre outros. A presença de cabos longos entre o inversor e o motor agravam o problema, ao se comportarem como linhas de transmissão para os pulsos de tensão de saída do inversor.

Tais problemas vêm sendo estudados nas últimas duas décadas, onde sua análise resultou em propostas viáveis de solução. Neste contexto, métodos que buscam mitigar os problemas de sobretensão e de modo comum em uma única configuração tornaram-se uma interessante proposta de análise, onde se concentrou grande parte deste trabalho. Dentre as várias topologias analisadas, buscou-se modelos que apresentavam soluções mais viáveis para implementação em sistemas reais, simplicidade de projeto e eficiência na atenuação de sobretensões e correntes de modo comum. Desta busca, o filtro dv/dt juntamente com modificações que eliminem também as grandezas de modo comum, foi aquele escolhido para ser analisado e implementado. Foi feita uma revisão da literatura acerca de modelos

que atendessem aos pré-requisitos de análise anteriormente citados e alguns deles foram então implementados no modelo de simulação para análises de validação do modelo e desempenho do filtro.

Para o desenvolvimento, estudo e melhorias de projetos de filtros foi elaborado um modelo de simulação do sistema que buscou representar cada componente do sistema real de forma precisa, levando em consideração o comportamento deste em altas frequências. O desenvolvimento do modelo foi feito em um programa do tipo EMTP (Electromagnetic Transients Program) de análise de transitórios eletromagnéticos de sistemas elétricos, o PSCAD/EMTDC[©]. O sistema é representado no domínio das fases, de maneira que as características apresentadas por uma determinada configuração do sistema podem ser analisadas num único modelo.

Através deste modelo, foi possível a análise de sobretensão, tensão de modo comum e circulação de correntes de modo comum, concomitantemente, em uma única simulação. Algumas topologias de filtro inseridas necessitavam da conexão ao ponto médio do barramento de corrente contínua como forma de maior atenuação das correntes de modo comum. Entretanto, nem sempre encontra-se o ponto médio do barramento acessível em inversores disponíveis comercialmente e, portanto, novas formas de conexão ao barramento puderam ser testadas e seu desempenho pode ser avaliado antes de se implementadar experimentalmente, como forma de precaução à possíveis tensões nos semicondutores.

Resultados experimentais vieram validar o modelo e mostrar que sua utilização quando da análise de técnicas de mitigação constitui parte interessante para busca de melhorias na implementação experimental.

Em resumo, pode-se citar as contribuições deste trabalho da seguinte maneira:

- Levantamento de projetos de topologias de filtros passivos dv/dt e modo comum.
- Desenvolvimento do modelo de simulação do sistema que se constitui como ferramenta adicional no projeto e desenvolvimento de filtros.
- Busca de novas formas de conexão do filtro ao barramento de corrente contínua.

6.1 Propostas de Continuidade

Com relação à principal contribuição deste estudo - o desenvolvimento do modelo de simulação - podem ser feitas várias melhorias a fim de tornar sua aplicação mais abrangente, conforme a seguir:

- Pode-se tornar o modelo mais completo de forma a abranger outras topologias de filtros ao se representar de forma mais detalhada o indutor de modo comum, detalhando seu comportamento de forma a aproximá-lo do indutor real.
- Modelagem do transformador de modo comum para inserção no modelo e análise computacional de seu desempenho na redução do modo comum.
- Outras formas de modulação podem ser inseridas no do inversor do modelo computacional. A implementação de tais modulações constitui análise importante no sistema, visto que atuam e buscam soluções a partir da própria fonte geradora do problema.
- Modelagem do transformador de alimentação;
- Modelagem mais aprofundada do conversor, de forma a representar seu comportamento em altas frequências.

Apêndice A

Formas de Aterramento

A análise e a busca de soluções para os problemas causados por interferências, que resultam do processo de operação PWM que usam como dispositivos semicondutores de chaveamento os IGBTs, requerem um estudo mais completo do sistema com atenção voltada para as novas fontes de interferência eletromagnética criadas a partir da circulação do modo comum no sistema. Este texto constitui-se num relatório de pesquisa onde serão detalhadas certas características fundamentais para a verificação da circulação modo comum nas redes de aterramento, tipos de cabos e formas de instalação mais eficientes na sua redução a fim de se caracterizar como fonte de informação adicional. Maiores detalhes podem ser encontrados nas referências [36, 42, 43].

O estudo da interferência eletromagnética divide o problema em três etapas (gerador - meio de propagação - receptor): fonte de interferência, meios de acoplamento por condução ou radiação e circuitos susceptíveis à magnitude, frequência e taxa de repetição da interferência. No caso do sistema analisado tem-se operação de chaveamento (fonte), acoplamentos capacitivos e redes de aterramento (meios de propagação), dispositivos de proteção, rolamentos do motor e demais (receptores). Desta forma, o estudo da presença do modo comum nas redes de aterramento é de extrema importância, visto que este acaba sendo o principal caminho de circulação das correntes.

Existem, entretanto, "caminhos" com maior probabilidade de circulação de correntes de modo comum no sistema dependendo do tipo de instalação escolhida. Para análise

de todos as prováveis malhas percorridas pelas correntes citadas no estudo apresentado a seguir, é considerada uma instalação em que os três cabos, não blindados, são distribuídos aleatoriamente em uma bandeja e aterramento comum. O aterramento do motor permite que a corrente de modo comum percorra toda a rede de aterramento (Fig A.1).

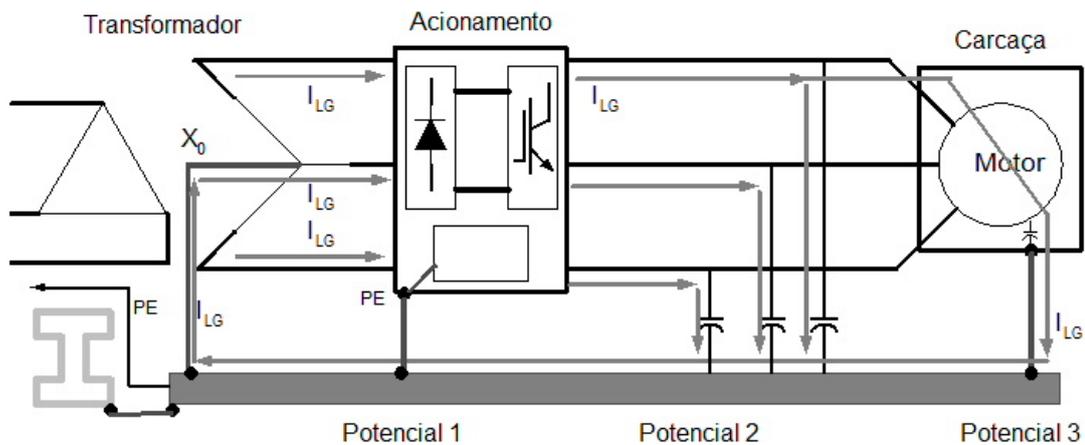


Figura A.1: Circulação do modo comum em sistema com cabos não blindados distribuídos aleatoriamente e aterramento comum.

A carcaça do motor é aterrada a uma rede de aterramento em um Potencial 3, e o condutor PE do motor está conectado ao PE do acionamento e à rede de aterramento em um Potencial 1. Existem dois caminhos prováveis para a corrente de modo comum, um é através da capacitância entre cabo e terra e o outro através dos enrolamentos do estator e terra. A corrente de modo comum retorna ao acionamento (Potencial 1) tanto pelo cabo PE quanto através da rede de aterramento do motor-acionamento, dependendo de qual apresenta menor impedância na frequência de oscilação do transitório da corrente. Não existe conexão física entre PE (Potencial 1) e o barramento de corrente contínua, de forma que o principal caminho restante para completar a rota da corrente de modo comum de volta ao acionamento é através do neutro do transformador alimentador e das fases de

entrada do acionamento.

Redes de aterramento apresentam alta impedância para correntes de modo comum de alta frequência, de forma que uma diferença de tensão de modo comum instantânea é criada entre diferentes potenciais (regiões) da rede de aterramento. A tensão de modo comum é impressa em equipamentos susceptíveis que estejam ligados a esse sistema. A tensão de modo comum também é impressa entre o potencial 3 e o aterramento do acionamento. Equipamentos adicionais referidos aos potenciais 1,2 e 3 podem também experimentar tensão de modo comum e problemas associados.

São analisadas a seguir algumas técnicas que contribuem para eliminação do modo comum, atuando-se nas medidas para instalação do sistema. A instalação torna-se mais eficiente à medida que mais métodos são incorporados. Serão discutidos:

- Aterramento em alta e baixa frequências.
- Blindagem do ruído, afastando-o de equipamentos susceptíveis.

Aterramento em Alta e Baixa Frequências

A filosofia de aterramento em processos industriais tem sido historicamente centrada em preocupações com baixas frequências, enquanto garantiam máxima proteção contra tensões transitórias e mantinham boa avaliação durante faltas para a terra. Entretanto, a filosofia de aterramento do sistema quando aplicada a acionamentos, influencia na magnitude e nos caminhos de acoplamento de EMI geradas por acionamentos PWM.

O sistema não aterrado tem uma vantagem na falta fase terra que é a de não exigir interrupção de fluxo de potência. A desvantagem é que transitórios de tensão entre fase e terra no primário são passadas para o secundário sem atenuação. Outra desvantagem é que o neutro do transformador está capacitivamente acoplado à terra, permitindo que ocorram

flutuações de tensão durante transitórios e sobrecarreguem o sistema de isolamento entre linha e neutro. O principal problema em um sistema com neutro não aterrado é que uma falta em arco pode se formar para a terra, causando agravamento das tensões para a terra para valores muitas vezes maiores do que as tensões normais entre linha e terra. No entanto, com relação à interferência eletromagnética em acionamentos, o transformador aberto interrompe o caminho condutivo de retorno da corrente de modo comum para a entrada do ASD. Então, o modo comum terá redução na corrente na rede de aterramento para somente aquela que passa pelas capacitâncias parasitas entre o transformador e a terra.

Aterramento sólido do sistema

Esta filosofia fornece grande atenuação dos transitórios de tensão do primário entre linha e neutro, reduz a possibilidade de sobrecarga no isolamento entre linha e neutro e elimina o problema de tensão entre linha e terra devido a uma falta em arco, visto que o neutro é mantido no potencial da terra. Uma desvantagem é que a falta entre linha e terra irá provocar interrupção imediata, e a possibilidade de causar mais danos devido a alta energia a ser dissipada. Com relação a EMI de ASDs, este tipo de aterramento completa o circuito para corrente de modo comum através do neutro aterrado, pois a corrente de modo comum retorna para o acionamento. Então a corrente de modo comum é maior em rede de aterramento com sistemas de aterramento sólido. No entanto, a malha de corrente de modo comum está contida no neutro do transformador e o ruído não entra na rede de aterramento no lado primário do transformador.

Sistema de aterramento com alta resistência

Adiciona uma resistência ao neutro terra de valor ôhmico suficiente para limitar a corrente de falta para a terra. Embora o neutro não esteja ligado ao aterramento, esse valor de resistência irá limitar a tensão para a terra durante uma falta em arco para a terra para níveis suficientemente baixos para evitar falhas no isolamento. Atenuações secundárias de tensões transitórias entre linha e terra dependem do valor do resistor escolhido.

Este método se tornou padrão em muitos processos industriais devido ao fato de que uma falta entre linha e terra não requer "fechamento" imediato do equipamento afetado. Com relação à EMI, o resistor reduz significativamente o pico de corrente de modo comum e fornece resistência de amortecimento adicional ao circuito visto que o resistor está agora em série com o caminho de retorno da corrente de modo comum de volta ao acionamento. Então, a diferença entre os potenciais de tensão de modo comum em altas frequências são minimizados. Entretanto, a corrente que flui através deste sistema de aterramento com resistor pode acionar erroneamente o indicadores de faltas para a terra e pode ser necessária a instalação de filtro para prevenir falsos alarmes.

Aterramentos Seguros

Aterramentos seguros garantem potenciais de tensão aceitáveis na presença de condições de falta. O gabinete do ASD, área de montagem (painéis) e portas são tipicamente ligadas a um sistema de barra de cobre na base da cabine que está conectada via condutor de terra ao ponto de tensão zero conveniente. Cabos e conduítes de entrada e saída são imperativamente ligados à estrutura da cabine. As ligações dos cabos são importantes visto que essas estruturas podem carregar correntes de alta frequência. Garantem também que sob operação PWM, não haverá acúmulo de carga elétrica através de corrente de dispersão ou por corrente de interferência eletromagnética de alta frequência que esteja circulando

na rede de aterramento.

Requerimentos de aterramento do motor são realizados ligando-se o condutor de aterramento dentro da caixa de junção e retornado ao terminal PE do ASD, onde um condutor PE garante um caminho metálico condutivo para a terra. Esse método de aterramento garante uma conexão sólida com a terra e aumenta o tempo de vida do equipamento enquanto fornece um possível caminho de retorno, outro que não a rede de aterramento, para correntes de alta frequência induzidas na capacitância entre enrolamento do estator para a carcaça aterrada do motor durante os transitórios de chaveamento.

Sistema de Aterramento Satisfatório

A resistência de aterramento é afetada pela resistividade do solo, que depende da quantidade de umidade. Aterramentos feitos através de múltiplos vergalhões em solos de baixa resistividade podem fornecer um caminho adequado e de baixa impedância para 60 Hz e correntes de alta frequência. Uma instalação usando vigas de aterramento ligadas a uma instalação no chão pode exibir uma alta resistência entre as vigas e a estrutura metálica devido à característica do solo, como seco e rochoso embaixo da estrutura.

Blindagem - Desvio da Interferência

Uma boa maneira de mitigação das grandezas associadas ao modo comum é controlar o caminho tomado na condução, o que pode ser feito desviando-se a interferência do aterramento e de equipamentos sensíveis.

Emissões eletromagnéticas da saída do acionamento contém vários componentes de frequência. Existe uma componente elevada de campo elétrico emitida radialmente dos cabos, devido ao tempo de subida dos pulsos PWM dv/dt e as componentes da frequência

da portadora presentes na tensão. Existe uma componente circular de campo magnético de baixa frequência em volta dos cabos devido à frequência fundamental de saída do acionamento, uma componente de campo magnético de média frequência devido a frequência da portadora da corrente e uma componente de campo magnético e elétrico de alta frequência devido aos transitórios di/dt das correntes de modo comum conduzidas nos cabos. Emissões de campos elétricos e magnéticos para cabos que entram no acionamento não são tão severos quanto os dos cabos que saem dos acionamentos.

Na sequência, alguns tipos mais comuns de cabos são analisados levando-se em conta a melhor alternativa para redução do ruído.

Os cabos em bandeja com condutores isolados e distribuídos aleatoriamente sofre a possibilidade de correntes por capacitâncias parasitas para a bandeja aterrada repetindo o cenário representado anteriormente. Sendo não revestido ainda há possibilidade de irradiação de altos campos elétrico e magnético. Os cabos em bandeja podem ser uma melhoria desde que seja revestida e aterrada para minimizar emissões magnéticas e impedâncias desbalanceadas.

O cabo armado é uma boa alternativa para ASDs pois pode reduzir as emissões de campo magnético devido ao revestimento metálico. Também tem a possibilidade de conter as correntes de alta frequência para fora da rede de aterramento com a baixa impedância do revestimento coaxial. Este tipo de cabo pode ser revestido de PVC para prevenir a circulação de correntes no revestimento de acidentalmente passar para o aterramento. O cabo de armação de alumínio soldado ou trançado, blindado e de bandeja, representa a melhor técnica escolhida para ASDs.

Redução de Condução de Corrente para a Terra

Diante do exposto acima, é encontrada na literatura uma análise de tipos de cabo e instalação que reduz mais efetivamente a corrente de modo comum de alta frequência conduzida na rede de aterramento.

Instalação 1: 3 condutores mais o terra em conduíte de aço

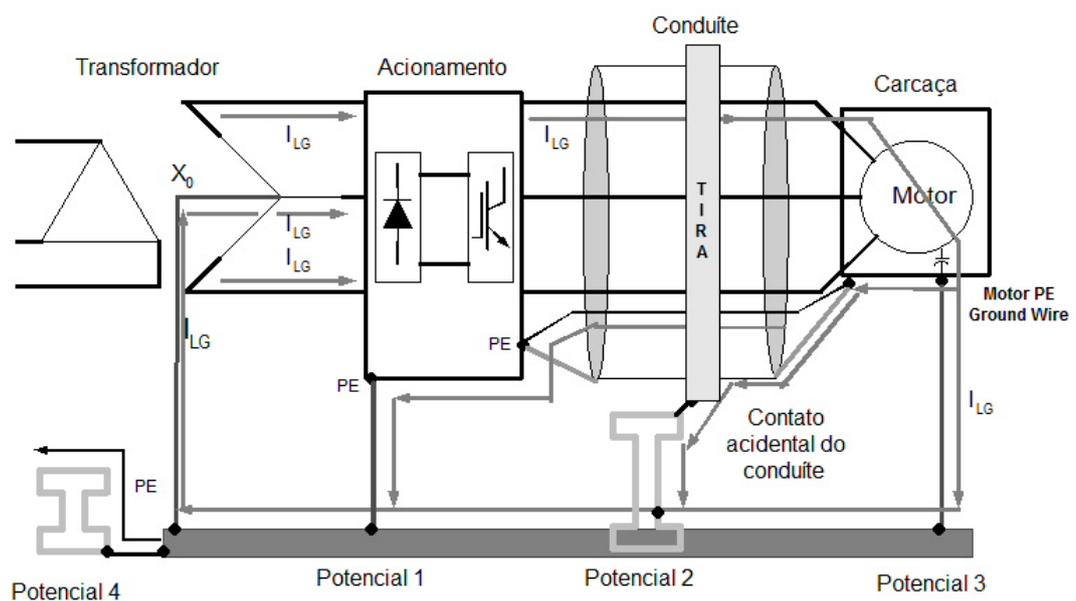


Figura A.2: Instalação 1

Os terminais do conduíte são ligados à cabine de acionamento e à caixa de junção do motor. O condutor de aterramento PE é ligado a ambos os terminais na barra PE do acionamento e no aterramento do motor.

Há um condutor no conduíte que coleta a maioria das correntes transitórias capacitivas e as retorna de volta ao acionamento, reduzindo assim o ruído na rede de aterramento no cabo entre acionamento e motor. O condutor PE de aterramento fornece um caminho de baixa resistência de volta ao acionamento para correntes de modo comum de frequências

mais baixas, que felizmente é menor que a impedância da rede de aterramento. No entanto, as interferências de alta frequência no condutor de aterramento causam aumento da resistência devido ao efeito pelicular e a indutância do condutor em altas frequências contribui para a alta impedância da rede de aterramento, especialmente para cabos longos. Então, a corrente de modo comum tende a fluir no tubo da conduíte que atua como um retorno para correntes de modo comum. O controle dos caminhos percorridos pelas correntes de modo comum não são garantidos com a conduíte e problemas com interferências no sistema de aterramento podem ou não ocorrer.

O primeiro problema é que a impedância de modo comum da conduíte é variável, devido a baixa condutividade do aço em altas frequências e ao fato de que as junções da conduíte podem ser corroídas com o tempo e não fornecerem contato ideal. Além disso, as características da resistência AC do aterramento são geralmente variáveis. Então, é imprevisível estabelecer como a corrente se divide entre os condutores, conduíte ou rede de aterramento.

O segundo problema é que a corrente de modo comum que flui no conduíte pode retornar para a rede de aterramento via tiras da conduíte ou contatos inesperados de conduíte e estrutura da rede de aterramento como no potencial 2, o que induzirá tensões de modo comum para equipamentos referidos a esse nó.

O terceiro problema é que as reflexões da tensão de modo comum podem ainda existir para interfaces de equipamentos susceptíveis referidos entre potencial 1 e o aterramento. Isso acontece devido ao fato de as correntes de modo comum retornarem de volta do aterramento do conduíte e do motor e entrar novamente na rede de aterramento no potencial 1, através do transformador e ao acionamento através dos condutores de entrada. Então, esta forma de instalação é também recomendada para o conduíte entre transformador e

acionamento, com o condutor de aterramento ligado ao neutro do secundário do transformador e outro condutor do transformador para a estrutura da rede de aterramento. Fornecendo, dessa forma, uma baixa impedância e caminho previsível de retorno metálico fora da rede de aterramento para as correntes de modo comum.

De maneira geral o sistema de conduíte melhorou as características de rejeição às interferências de alta frequência comparado ao método aleatório de cabeamento. O uso de conduítes e indutores de modo comum tem sido feito com sucesso em centenas de aplicações industriais de alto risco.

Instalação 2: Saída blindada e revestimento isolado de PVC

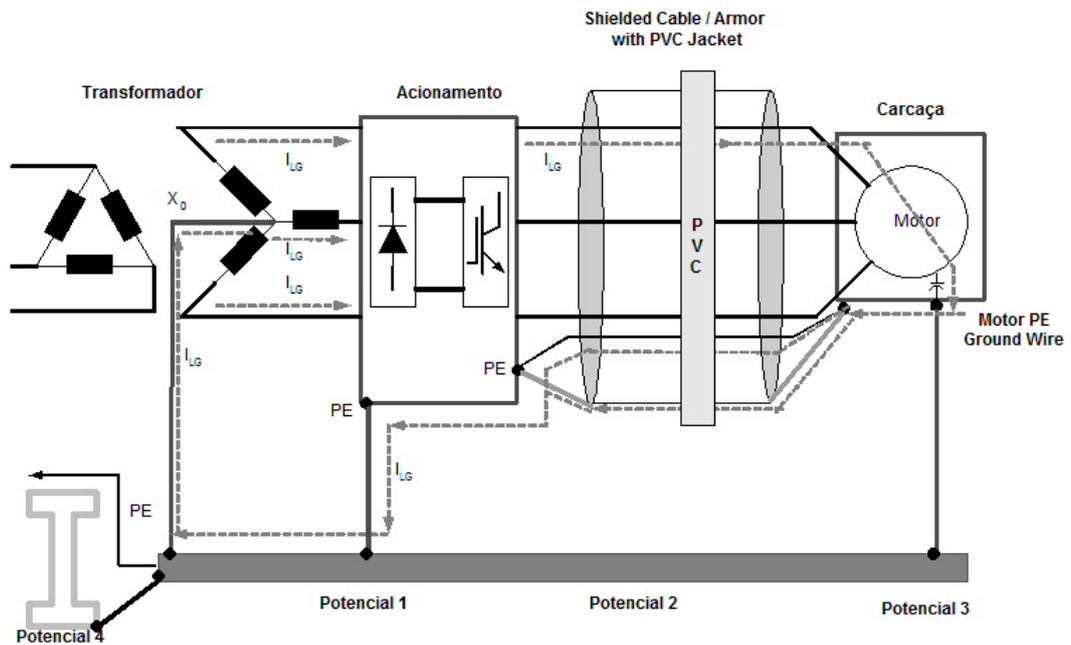


Figura A.3: Instalação 2

O cabo blindado em bandeja ou cabo revestido com armadura de alumínio e PVC é uma solução viável para controlar as correntes de alta frequência do acionamento e desviá-las da circulação no sistema de aterramento. Condutores blindados e de aterramento são ligados em ambos os lados de aterramento, do acionamento e do motor, para prevenir

que as correntes de modo comum nos enrolamentos do motor circulem na rede de aterramento. A baixa resistência do condutor de aterramento atende aos requerimentos de aterramento, enquanto conduz alguma parte dos componentes de baixa frequência da corrente de modo comum. A armação ou blindagem trançada de cobre é predominantemente o caminho de retorno das correntes de modo comum, desde que represente tanto retorno de baixa resistência e baixa indutância para essas correntes. O revestimento isolado de PVC garante que a maior parte de corrente de modo comum retorne de volta ao acionamento na blindagem e fora de contatos acidentais com a rede de aterramento. Uma parte bem pequena do ruído vai para o PE da rede de aterramento entre o potencial 1 e o potencial 3. Então as diferenças de potencial de tensão na rede de aterramento entre os potenciais 3 e 1 são minimizados.

No entanto, se o transformador de alimentação do acionamento estiver longe, as correntes de modo comum que retornam da blindagem do cabo do motor podem entrar novamente na rede de aterramento no potencial 1 como discutido para o condutite.

Instalação 3: Blindagem na entrada e blindagem na saída do cabo

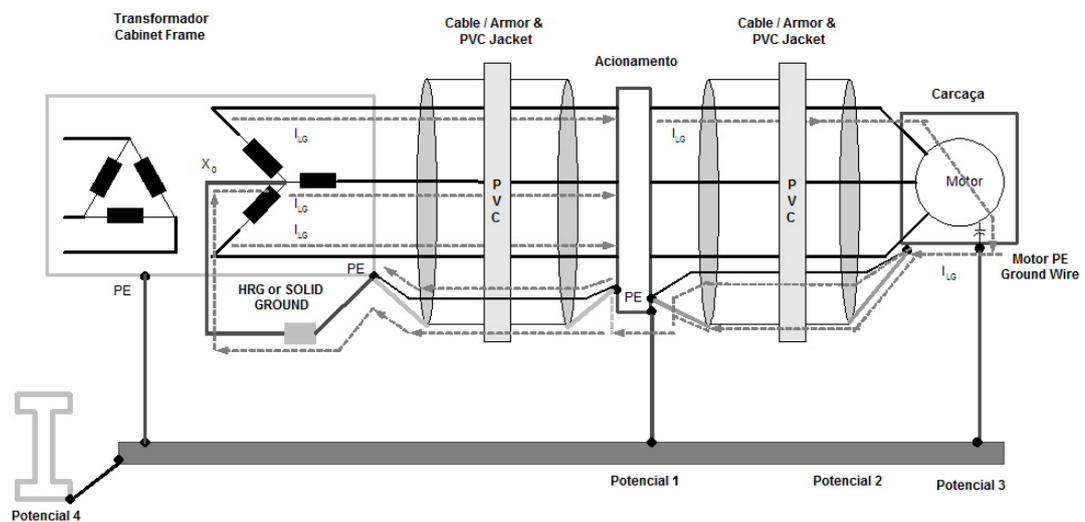


Figura A.4: Instalação 3

Cabos blindados ou armados com revestimento de PVC em ambos os lados, entrada e saída, previnem interferência com outros equipamentos sensíveis por fornecerem um caminho isolado para as correntes de modo comum para e a partir do acionamento. Então, a interferência não é reintroduzida para a rede de aterramento por contatos acidentais ou outras formas. Blindagem e condutores de terra são ligados em ambos os aterramentos do acionamento e do motor para prevenir circulação de correntes de modo comum dos enrolamentos do motor na rede de aterramento entre o acionamento e o motor. Blindagem e condutores de terra são ligados a ambos os aterramentos PE do acionamento e do transformador para prevenir que correntes de modo comum entrem na rede de aterramento entre o PE do acionamento e o PE do transformador. Condutores de entrada com blindagem são recomendados para instalações onde interferências irradiadas AM não são aceitáveis, onde o acionamento e o transformador são localizados longe um do outro ou quando grande quantidade de equipamentos sensíveis se encontram na região de aplicação.

No entanto, o cabo blindado não irá resolver problemas de interferências em dispositivos de proteção contra faltas, desde que blindagens aterradas e condutores PE nas unidades de aterramento com grande resistência devem permitir correntes de modo comum entrem novamente no neutro do transformador.

Efetividade de cabos blindados

A maior parte dos danos causados a equipamentos eletrônicos sensíveis acontecem pela alta magnitude das correntes de modo comum presentes no plano de aterramento. O equipamento é desenvolvido para operar com potencial de referência do aterramento quase zero, e este não é o caso quando ruídos de alta frequência estão presentes na rede de aterramento.

Cabos idealmente desenvolvidos para acionamentos podem reduzir os efeitos das correntes de modo comum pela blindagem e condutores de aterramento que podem carregar o ruído de volta ao acionamento com uma impedância que é muitas vezes menor que a impedância da rede de aterramento. A magnitude da corrente de modo comum que flui na rede de aterramento é determinada pela regra de divisão de impedâncias entre impedância do cabo de aterramento/blindagem e resistência da rede de aterramento. O cabo ideal deve ter uma impedância de surto de modo comum, tanto em baixa como em alta frequência, que seja menor que a impedância típica da rede de aterramento do sistema que é da ordem de 1 a 25 Ω .

Em baixas frequências, a impedância da blindagem de aterramento é essencialmente uma resistência dc da blindagem de cobre, folha de alumínio e aterramentos de cobre em paralelo. Isso é muito baixo se comparado com a impedância da rede de aterramento, de maneira que a corrente de modo comum é divergida da rede de aterramento para a blindagem/aterramento do cabo. A blindagem do cabo tem um condutor interno de aterramento PE para ruídos de baixa frequência, condutor folha de blindagem/drenagem para ruídos de alta frequência de 2 MHz a 10 MHz e cobertura de cobre bem fina de baixa indutância/ baixa resistência tanto para ruídos de baixa como de alta frequência. Valores de impedância aceitáveis menores que 10 Ω são agora estendidos para valores de frequência de 1.5MHz. Então, espera-se que esta configuração seja um método efetivo na redução do ruído, desenvolvido para capturar a maior parte da corrente de modo comum de alta frequência e retorná-la de volta ao acionamento fora da rede de aterramento.

Referências Bibliográficas

- [1] A. F. Moreira, P. M. Santos, T. A. Lipo, and G. Venkataramanan, “Filter networks for long cable drives and their influence on motor voltage distribution and common-mode currents,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 2, pp. 515–522, April 2005.
- [2] D. Rendusara and P. Enjeti, “New inverter output filter configuration reduces common mode and differential mode dv/dt at the motor terminals in pwm drive systems,” *Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1269–1275, 1997.
- [3] L. Palma and P. Enjeti, “An inverter output filter to mitigate dv/dt effects in pwm drive system,” *IEEE 17th APEC*, pp. 550–556, March 2002.
- [4] N. Hanigovszki, J. Landkildehus, and F. Blaabjerg, “Output filters for ac adjustable speed drives,” *IEEE - Applied Power Electronics Conference, APEC 2007 - Twenty Second Annual IEEE*, pp. 236–242, March 2007.
- [5] A. F. Moreira, “Modeling and design of filter networks for high power converters utilizing fast hard switching devices,” Ph.D. dissertation, University of Wisconsin - Madison, 2002.
- [6] P. M. dos Santos, “Projeto e desenvolvimento de filtros passivos para eliminação de sobretensão em acionamentos elétricos de baixa tensão,” Master’s thesis, UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.
- [7] E. Persson, “Transient effects in application of pwm inverters to induction motors,”

- IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, no. 5, pp. 1095–1101, September/October 1992.
- [8] A. von Jouanne, P. Enjeti, and W. Gray, “Application issues for pwm adjustable speed ac motor drives,” *IEEE Industry Applications Magazine*, pp. 10–18, September/October 1996.
- [9] H. de Paula, M. Lisboa, J. Guilherme, W. Boaventura, and M. Chaves, “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 Alicações Industriais*, Agosto 2008.
- [10] H. de Paula, “Uma nova metodologia para a determinação dos fenômenos de alta frequência em sistemas de acionamento de motores de indução através de inversores pwm,” Ph.D. dissertation, UFU - Universidade Federal de Uberlândia, 2005.
- [11] A. H. Bonnett, “Analysis of the impact of pulse-width modulated inverter voltage waveforms on ac induction motors,” *IEEE - Transactions on Industry Applications*, 1996.
- [12] A. F. Moreira, T. A. Lipo, G. Venkataramanan, and S. Bernet, “High-frequency modeling for cable and induction motor overvoltage studies in long cable drives,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 5, pp. 1297–1306, September/October 2002.
- [13] A. von Jouanne, H. Zhand, and A. K. Wallace, “An evaluation of mitigation techniques for bearing currents, emi and overvoltages in asd applications,” *IEEE - Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 5, pp. 1113 – 1122, September/October

- 1998.
- [14] M. Hongfei, X. Diangui, C. Xiyu, and C. Bo, “A novel common-mode sinusoidal inverter output filter with variable inductor,” *Power Conversion Conference, PCC Osaka 2002*, vol. 2, pp. 710 – 715, August 2002.
- [15] P. C. Magnusson, G. C. Alexander, and V. K. Tripathi, *Transmission Lines and Wave Propagation*, 3rd ed. Department of Electrical and Computer Engineering Oregon State University Corvallis, Oregon: CRC Press, 1992.
- [16] K. Tse, H. Chung, S. Hui, and H. So, “A comparative estudy of carrier-frequency modulation techniques for conduced emi suppression in pwm converters,” *IEEE - Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 3, pp. 618 – 627, June 2002.
- [17] G. Skibinski, J. Pankau, R. Sladky, and J. Campbell, “Generation, control and reglation of emi from ac drives,” *IEEE Industry Application Society*, pp. 1571–1583, October 1997.
- [18] S. Ogasawara and H. Akagi, “Analysis and reduction of emi by a pwm inverter-fed ac motor drive system having long power cables,” *Power Electronics Specialists Conf. Rec.*, vol. 2, pp. 928 – 933, 2000.
- [19] ———, “Modeling and damping of high frequency leakage currents in pwm inverter-fed ac motor drive systems,” *IEEE*, pp. 29 – 36, 1995.
- [20] C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [21] E. Jay M., R. J. Kerkman, D. W. Schlegel, and G. L. Skibinski, “Effect of pwm

- inverters on ac motor bearing currents and shaft voltages,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 2, pp. 250 – 259, March/April 1996.
- [22] D. Busse, J. Erdman, R. J. Kerkman, D. Schlegel, and G. Skibinski, “Characteristics of shaft voltage and bearing currents,” *IEEE Industry Applications Magazine*, pp. 21–32, November/December 1997.
- [23] W. L. Stebbins, *How to Select & Apply ASD Systems - Selected Readings*. IEEE - The Institute of Electrical Engineers, 2000.
- [24] M. M. S. e Roginelle Salatiel da Silva Pires, “Técnicas de mitigação da tensão de eixo e correntes de rolamento em motores de indução: Estado da arte,” UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, Tech. Rep., Julho 2004.
- [25] S. Chen and T. A. Lipo, “Bearing currents and shaft voltages of an induction motor under hard and soft switching inverter excitation,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 5, pp. 1042 – 1048, September/October 1998.
- [26] R. Schiferl and M. Melfi, “Bearing current remediation options,” *IEEE Industry Applications*, vol. 10, no. 4, pp. 40 – 50, July/August 2004.
- [27] D. Busse, J. Erdman, R. Kerkman, D. Schlegel, and G. Skibinski, “An evaluation of the electrostatic shielded induction motor: A solution for rotor shaft voltage buildup and bearing current,” *IEEE - Transactions on Industry Applications*, vol. 33, pp. 1563–1570, Nov./Dec. 1997.
- [28] H. Zhang, A. von Jouanne, and S. Dai, “A reduced-switch dual-bridge inverter topology for the mitigation of bearing current, emi, and dc-link voltage variations,” *IEEE - Transactions on Industry Applications*, vol. 37, no. 5, pp. 1645–1653, 2001.

- [29] H. Chung, S. Hui, and K. Tse, "Reduction of power converter emi emission using soft-switching technique," *IEEE - Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 40, pp. 280 – 287, August 1998.
- [30] H. Zhang, A. von Jouanne, S. Dai, A. K. Wallace, and F. Wang, "Multilevel inverter modulation schemes to eliminate common-mode voltages," *IEEE - Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 6, pp. 1645–1653, 2000.
- [31] A. L. Julian, G. Oriti, and T. A. Lipo, "Elimination of common mode voltage in three phase sinusoidal power converters," *IEEE - Transactions on Industry Applications*, vol. 14, no. 5, pp. 982–989, September 1999.
- [32] S. Ogasawara and H. Akagi, "Circulation current reduction for a motor simulator," *IEEE*, pp. 2015–2021, 2001.
- [33] J. Yanshu, X. Diango, , and C. Xiyou, "A novel inverter output dv/dt supression filter," *Industrial Electronics Society*, pp. 2901–2905, 2003.
- [34] H. Akagi, H. Hasegawa, and T. Doumoto, "Design and performance of a passive emi filter for use with a voltage-source pwm inverter having sinusoidal output voltage and zero common-mode voltage," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 4, pp. 1069–1076, July 2004.
- [35] H. Akagi and T. Duomoto, "An approach to eliminating high-frequency shaft voltage and leakage current from a inverter-driven motor," *IEEE - Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 4, pp. 1162 – 1169, July/August 2004.
- [36] G. L. Skibinski, R. J. Kerkman, and D. Schlegel, "Emi emissions of modern pwm

- ac drives,” *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 5, no. 6, pp. 47–81, November/December 1999.
- [37] T. Milagres, A. Moreira, W. Boaventura, and H. Paula, “Implementation of distributed-parameter model of power cable in pscad/emtdc software,” *COBEP 2007 - IX Congresso Brasileiro em Eletrônica de Potência*, set/out 2007.
- [38] T. de Fernandes and L. Milagres, “Modelo computacional para cabos de potência utilizados em acionamentos elétricos de motores de indução,” Master’s thesis, UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.
- [39] A. von Jouanne and P. Enjeti, “Design considerations for an inverter output filter to mitigate the effects of long motor leads in asd applications,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 5, pp. 1138 – 1145, Sep/Oct 1997.
- [40] U. P. Disclosure, “Filter to reduce differential mode and common mode dv/dt at the motor terminals in pwm drive systems,” TAMU 1996.
- [41] S. M. Muyeen, M. A. Mannan, M. H. Ali, R. Takahashi, T. Murata, and J. Tamura, “Simulation technique & application of space-vector pwm method in pscad/emtdc,” *ICICT - International Conference on Information and Communication Technology*, March 2007.
- [42] R. Morrison, *Grounding and Shielding Techniques*, 4th ed. John Wiley & Sons, Inc, 1998.
- [43] Industrial and C. P. S. C. of the IEEE Industry Applications Society, *IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1972.