

DANIEL DE PAULA DOS SANTOS

Estudo comparativo de métodos de redução da sobretensão em motores
acionados por conversores de frequências

SÃO PAULO
2023

DANIEL DE PAULA DOS SANTOS

**Estudo comparativo de métodos de redução da sobretensão em motores
acionados por conversores de frequências**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção de
título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antonio França
Sartori

SÃO PAULO
2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 07 de março de 2023

Assinatura do autor:



Assinatura do orientador:



Catlogação-na-publicação

Santos, Daniel de Paula dos

Estudo comparativo de métodos de redução da sobretensão em motores acionados por conversores de frequências / D. de Paula dos Santos – versão corr. – São Paulo, 2022.

156 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Sistemas elétricos de potência 2.Motores elétricos 3.Eletrônica de potência 4.Conversores elétricos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

Nome: SANTOS, Daniel de Paula dos

Título: Estudo comparativo de métodos de redução da sobretensão em motores acionados por conversores de frequências

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção de título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: 03 de março de 2023

Banca Examinadora

Prof. Dr. Carlos Antonio França Sartori

Instituição: IPEN-PROF (IPEN)

Julgamento: APROVADO

Dr. Godofredo Winnischofer

Instituição: EXTERNO

Julgamento: APROVADO

Prof. Dr. Pedro Pereira de Paula

Instituição: IPEN-PROF – EXTERNO

Julgamento: APROVADO

À minha esposa Luiza, por todo o companheirismo e amor.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Carlos Antonio França Sartori pela orientação, pelos ensinamentos, pelo apoio, pela convivência e, principalmente, pela paciência.

Ao Prof. Dr. José Roberto Cardoso, pelo incentivo, pela receptividade e por inspirar tantos profissionais da área.

À Escola Politécnica da USP e aos professores que compõem o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Aos colegas de turma, aos companheiros de trabalho e aos amigos que de alguma forma contribuíram nessa longa jornada.

Aos meus pais, irmãos e cunhadas, pelo incentivo, mesmo que a distância.

A todos os pesquisadores da área que publicaram e compartilharam suas descobertas, que coletivamente contribuem incessantemente para a construção de novos conhecimentos.

RESUMO

SANTOS, D. P. **Estudo comparativo de métodos de redução da sobretensão em motores acionados por conversores de frequências**. 2022. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

O acionamento de motores elétricos na indústria é realizado predominantemente por conversores de frequências. A conexão entre conversores e motores é feita por cabos elétricos. Esses cabos propagam os pulsos emitidos pelos conversores até os terminais de entrada do motor. A combinação de fatores como cabos longos, curto tempo de subida do pulso e grande diferença entre as impedâncias dos cabos e do motor, pode gerar reflexão de pulsos na interface entre cabos e motor. Essa reflexão de pulsos, em geral, origina, também, o aumento da tensão nessa interface, a sobretensão, que pode vir a causar queima ou *stress* do sistema de isolamento das bobinas do motor. O processo de reflexão do pulso gera, não só uma sobretensão instantânea, como, também, um transitório com oscilação causada pelas posteriores reflexões desse pulso nos terminais do conversor e nos terminais do motor. A literatura técnica apresenta diversos métodos para evitar ou reduzir a amplitude da sobretensão. Entretanto, à medida que as tecnologias dos conversores avançam e novos semicondutores são incorporados a esses dispositivos, os seus pulsos passam a ser emitidos com frequências cada vez maiores e tempos de subida cada vez menores, aumentando a ocorrência e a amplitude da sobretensão. A intensificação dos fatores geradores da sobretensão motiva o desenvolvimento de novas técnicas de mitigação da sobretensão, principalmente, técnicas que sejam flexíveis e adaptáveis a cenários futuros, nos quais esses fatores geradores da sobretensão tenham se agravado ainda mais. É nesse intuito que os métodos de redução da sobretensão que atuam nos conversores, que por meio de estratégias de chaveamento, visam a superpor os pulsos refletidos com novos pulsos emitidos pelo conversor, resultando em redução da amplitude dos pulsos refletidos, e consequente redução da amplitude da sobretensão. Avaliações individuais e comparativas de métodos consagrados para a redução da sobretensão e métodos que superpõem pulsos foram realizadas por meio de simulações computacionais. Todos os métodos avaliados foram capazes de reduzir consideravelmente a sobretensão. Após a otimização de alguns parâmetros dos métodos que utilizam da superposição de pulsos, a sobretensão foi reduzida a patamares ainda mais baixos.

Palavras-chave: Sistemas elétricos de potência. Motores elétricos. Eletrônica de potência. Conversores elétricos.

ABSTRACT

SANTOS, D. P. **Comparative study of overvoltage reduction methods in inverter-driven motors**. 2022. Dissertation (Master's Degree) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

In the industry, electric motors are predominantly driven by frequency inverters. The connection between inverters and motors is made by electrical cables. These cables propagate the pulses emitted by the inverters to the motor's input terminals. The combination of factors such as long cables, short rise time pulse and large difference between cables and motor impedances can generate pulse reflection at the cable-motor interface. This pulse reflection, in general, also causes voltage increase at this interface, the overvoltage, which can cause insulation burnout or stress on motor coils. The pulse reflection process generates not only an instantaneous overvoltage, but also an oscillatory transient, caused by the subsequent reflections of this pulse at the inverter terminals and at the motor terminals. The technical literature presents several methods to avoid or reduce the overvoltage amplitude. However, as inverter technologies advance and new semiconductors are incorporated into these devices, their pulses are emitted with increasing frequencies and increasingly shorter rise-times, also increasing the occurrence and amplitude of overvoltage. The intensification of overvoltage generating factors motivates the development of new overvoltage mitigation techniques, mainly, flexible and adaptable techniques, to be prepared for future scenarios, in which these overvoltage generating factors may have worsened even more. Matching these needs, the overvoltage mitigation methods act on the inverters, through switching strategies, to reduce the overvoltage amplitude by superposing the reflected pulses with new pulses emitted by the inverter, resulting in reflected pulses amplitude reduction and consequent overvoltage amplitude reduction. Individual and comparative assessments of those overvoltage mitigation methods, by pulses superposition, were carried out through computer simulations. All assessed methods were able to considerably reduce the overvoltage. After the optimization of some parameters related to the overvoltage mitigation methods by pulses superposition, the overvoltage was reduced even more.

Keywords: Electrical power systems. Electric motors. Power electronics. Power converters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cadeia de causas e efeitos da estratégia de chaveamento e da alta variação dv/dt	22
Figura 2 - Configuração básica do acionamento de um motor por um conversor de frequências	36
Figura 3 - Fenômeno de sobretensão nos terminais do motor por reflexão de ondas.....	38
Figura 4 - Curva genérica da sobretensão nos terminais do motor acionado por conversor ...	40
Figura 5 - Diagrama de treliças das reflexões dos pulsos de tensão	42
Figura 6 - Sequência de frentes de onda dos pulsos refletidos no cabo.....	43
Figura 7 - Detalhamento da curva genérica da sobretensão nos terminais do motor.....	44
Figura 8 - Transitório da sobretensão no motor durante a descida do pulso do conversor.....	47
Figura 9 - Transitório da sobretensão no motor após duas transições rápidas do nível de tensão do pulso emitido pelo conversor	47
Figura 10 - Circuito simplificado do arranjo de um motor acionado por um conversor via cabo	48
Figura 11 - Curva gerada através da equação da sobretensão no domínio do tempo	55
Figura 12 - Diagrama de treliças das reflexões de pulso de tensão no domínio das frequências	56
Figura 13 - Diagrama de blocos que descreve o transitório da sobretensão	57
Figura 14 - Curva gerada através da equação da sobretensão no domínio das frequências ...	58
Figura 15 - Comparação das curvas das equações no domínio do tempo e das frequências ...	58
Figura 16 - Filtros passivos para redução da sobretensão.....	60
Figura 17 - Sobretensão com filtro RLC nos terminais do conversor e com filtro RC nos terminais do motor	62
Figura 18 - Resistor de pré-inserção, arranjo esquemático.....	64
Figura 19 - Resistor de pré-inserção, arranjo físico.....	64
Figura 20 - Configuração do acionamento do motor por conversor de frequências de três níveis	66
Figura 21 - Diagrama de treliças para o lançamento de dois pulsos por um conversor de três níveis, com intervalo de tempo de $2tp$	67
Figura 22 - Diagrama de treliças para o lançamento de dois pulsos por um conversor de três níveis, com intervalo de tempo de $2tp$, representados no domínio das frequências	68
Figura 23 - Diagrama de blocos da função de transferência do transitório da sobretensão para o lançamento de dois pulsos com intervalo de $2tp$	68
Figura 24 - Sobretensão para o pulso de três níveis com transição dos estágios em intervalo de $2tp$	69
Figura 25 - Configuração de acionamento de motor com conversores em paralelo.....	70

Figura 26 - Configuração de acionamento de motor com dois conversores de dois níveis em paralelo	71
Figura 27 - Estratégias conjuntas de chaveamento de conversores em paralelo	71
Figura 28 - Representação por circuitos elétricos da configuração com conversores em paralelo	72
Figura 29 - Diagrama de treliças para a configuração com dois conversores em paralelo	74
Figura 30 - Diagrama de blocos da sobretensão com dois conversores em paralelo e pulsos com intervalo de $2tp$	74
Figura 31 - Sobretensão para dois conversores em paralelo com intervalo de $2tp$ entre os pulsos	75
Figura 32 - Diagrama de treliças para a configuração com três conversores em paralelo	77
Figura 33 - Diagrama de blocos da sobretensão com três conversores em paralelo e pulsos com intervalo de $2tp$	77
Figura 34 - Sobretensão para três conversores em paralelo com intervalo de $2tp$ entre os pulsos	78
Figura 35 - Configuração do acionamento do motor por conversor de frequências de três níveis e nível intermediário ajustado.....	79
Figura 36 - Diagrama de treliças para o lançamento de dois pulsos por um conversor de três níveis e nível intermediário ajustado, com intervalo de tempo de $2tp$	82
Figura 37 - Diagrama de blocos da função de transferência do transitório da sobretensão para o lançamento de dois pulsos de amplitude distintas e com intervalo de $2tp$	82
Figura 38 - Sobretensão para o pulso de três níveis com nível intermediário ajustado e intervalo entre os pulsos de $2tp$	83
Figura 39 - Modelos de representação de cabos elétricos	84
Figura 40 - Modelo de motor elétrico de indução, por fase, para frequências elevadas	86
Figura 41 - Representação do circuito elétrico do modelo simplificado.....	91
Figura 42 - Representação do circuito elétrico do modelo completo	91
Figura 43 - Parâmetros quantitativos e qualitativos de uma curva de resposta subamortecida	92
Figura 44 - Impedância de entrada do motor de 3 hp (fase-terra)	97
Figura 45 - Recorte da Impedância de entrada do motor de 3 hp para as principais frequências do modelo	98
Figura 46 - Valores de pico da sobretensão em razão do comprimento do cabo	100
Figura 47 - Valores de pico da sobretensão em razão do comprimento do cabo, para cabos representados por diferentes números de segmentos do modelo π	101
Figura 48 - Formas de onda da sobretensão para cabos representados por diferentes números de segmentos do modelo π , cabos de 100 m	102
Figura 49 - Curvas de forma de onda da simulação do modelo simplificado	103
Figura 50 - Curvas de forma de onda da simulação do modelo completo	103
Figura 51 - Curvas de forma de onda com dados experimentais	104

Figura 52 - Resultado de simulação – sobretensão sem nenhum método de redução, cabo de 30,48 m.....	105
Figura 53 - Resultado de simulação – detalhes da curva de sobretensão sem nenhum método de redução, cabo de 30,48 m.....	105
Figura 54 - Resultado de simulação – sobretensão sem nenhum método de redução, cabo de 100 m.....	106
Figura 55 - Resultado de simulação – detalhes da curva de sobretensão sem nenhum método de redução, cabo de 100 m.....	106
Figura 56 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão sem nenhum método de redução, cabos de 30,48 e 100 m representados por um segmento π	108
Figura 57 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão de motores de 3 hp e 25 hp, sem nenhum método de redução, com cabo de 30,48 representado por um segmento π	109
Figura 58 - Resultado de simulação – sobretensão com filtros RC e RLC, cabos de 30,48 e 100 m, linhas contínuas representam os resultados para o modelo completo, linhas pontilhadas representam os resultados para o modelo simplificado	110
Figura 59 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com filtros RC, cabos de 30,48 e 100 m, representados por um segmento π	111
Figura 60 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com filtros RC e Cf redimensionado	112
Figura 61 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com filtro RLC, cabo de 30,48m representado por um segmento π	113
Figura 62 - Resultado de simulação – sobretensão com filtro RLC, largura de pulso estendida, cabo de 30,48m representado por um segmento π	113
Figura 63 - Resultado de simulação –sobretensão com superposição de pulsos por conversor de três níveis, cabos de 30,48 e 100 m representados por um segmento π	116
Figura 64 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com superposição de pulsos por conversor de três níveis, cabos de 30,48 e 100 m representados por um segmento π	116
Figura 65 - Resultado de simulação –sobretensão com superposição de pulsos por conversor de três níveis com nível intermediário ajustado, cabos de 30,48 e 100 m representados por um segmento π	118
Figura 66 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com superposição de pulsos por conversor de três níveis com nível intermediário ajustado, cabos de 30,48 e 100 m representados por um segmento π	118
Figura 67 - Resultado de simulação – sobretensão com dois conversores em paralelo.....	120
Figura 68 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com dois conversores em paralelo, cabos representados por um segmento π	120
Figura 69 - Resultado de simulação –sobretensão com três conversores em paralelo	121
Figura 70 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com três conversores em paralelo, cabos representados por um segmento π	121

Figura 71 - Resultado de simulação – sobretensão com quatro conversores em paralelo.....	122
Figura 72 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com quatro conversores em paralelo, cabos representados por um segmento π	122
Figura 73 - Resultado de simulação – sobretensão com cinco conversores em paralelo	123
Figura 74 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com cinco conversores em paralelo, cabos representados por um segmento π	123
Figura 75 - Resultado de simulação – comparação do pico da sobretensão, utilizando diferentes métodos de redução, em razão do comprimento do cabo	125
Figura 76 - Valor de pico da sobretensão em razão do intervalo entre o disparo dos pulsos.	128
Figura 77 - Valor de pico da sobretensão com superposição de pulsos por conversor de três níveis em razão do intervalo entre o disparo dos pulsos	129
Figura 78 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com superposição de pulsos por conversor de três níveis e por conversor de três níveis com nível intermediário ajustado, cabo de 30,48 m representado por um segmento π	130
Figura 79 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com dois conversores em paralelo e com quatro conversores em paralelo, cabo de 30,48 m representado por um segmento π	130
Figura 80 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com três conversores em paralelo e com cinco conversores em paralelo, cabo de 30,48 m representado por um segmento π	131
Figura 81 - Resultado de simulação – parâmetros da curva de sobretensão com superposição de pulsos por conversor de três níveis com nível intermediário otimizado, cabo de 30,48 m representado por um segmento π	132
Figura 82 - Combinação de pulsos para dois conversores em paralelo.....	143
Figura 83 – Mapa bibliométrico de citações	152
Figura 84 – Mapa bibliométrico de acoplamento bibliográfico de artigos.....	153
Figura 85 – Mapa bibliométrico de acoplamento bibliográfico de autores.....	154
Figura 86 – Mapa bibliométrico de cocitações de artigos	155
Figura 87 – Mapa bibliométrico de co-citações de autores	156

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo do cálculo da tensão dos pulsos incidentes e refletidos nos terminais do motor	52
Tabela 2 - Exemplo do cálculo da tensão nos terminais do motor	52
Tabela 3 - Parâmetros para elaboração de simulações e gráficos ilustrativos	54
Tabela 4 - Parâmetros do conversor de frequências para as simulações	94
Tabela 5 - Parâmetros dos motores elétricos para as simulações	94
Tabela 6 - Parâmetros do cabo elétrico para as simulações	95
Tabela 7 - Parâmetros secundários, calculados a partir dos parâmetros primários.....	95
Tabela 8 - Parâmetros dos filtros passivos.....	96
Tabela 9 - Impedância de entrada do motor de 3 <i>hp</i> para as principais frequências do modelo.....	98
Tabela 10 - Compilação dos parâmetros obtidos por simulação para o cabo de 30,48 <i>m</i>	126
Tabela 11 - Compilação dos parâmetros obtidos por simulação para o cabo de 100 <i>m</i>	127
Tabela 12 - Pico da sobretensão antes e depois da otimização de parâmetros	133
Tabela 13 - Compilação dos parâmetros obtidos por simulação após otimização de parâmetros	133

LISTA DE SÍMBOLOS

C_c	Capacitância do cabo elétrico por unidade de comprimento
C_f	Capacitância do filtro passivo
C_g	Capacitância entre os enrolamentos do motor e a terra
C_t	Capacitância entre as espiras dos enrolamentos do motor
D	Ciclo de trabalho (<i>duty cycle</i>) do conversor de frequências
f_{ch}	Frequência fundamental do pulso (frequência de chaveamento) do conversor de frequências
$f_{max_{ts}}$	Frequência da componente máxima de subida do pulso do conversor de frequências ($1/\pi t_s$)
f_{osc}	Frequência da oscilação da sobretensão nos terminais do motor ($1/4t_p$)
L_c	Indutância do cabo elétrico por unidade de comprimento
l_c	Comprimento do cabo elétrico
L_d	Indutância de eixo direto do motor
L_f	Indutância do filtro passivo
L_t	Indutância entre as espiras dos enrolamentos do motor
P_m	Potência do motor
R_c	Resistência do cabo elétrico por unidade de comprimento
R_e	Resistência das perdas por correntes de Foucault no motor
R_f	Resistência do filtro passivo
R_g	Resistência das perdas de dissipação na carcaça do motor
R_s	Resistência interna do conversor de frequências
R_t	Resistência entre as espiras dos enrolamentos do motor
S	Amplitude máxima da sobretensão nos terminais do motor
t_0	Instante de disparo do pulso do conversor de frequências
T_{ch}	Período de chaveamento do pulso do conversor de frequências
T_{osc}	Período da oscilação da sobretensão nos terminais do motor
t_{acomod}	Último instante no qual a tensão nos terminais do motor se encontra fora de uma faixa de acomodação em torno da tensão de regime permanente
t_p	Tempo de propagação do pulso de tensão através da extensão do cabo elétrico
t_{pico}	Instante no qual ocorre a amplitude máxima da sobretensão nos terminais do motor
t_s	Tempo de subida do pulso do conversor de frequências
$t_{s_{Vm}}$	Tempo de subida da tensão nos terminais do motor

v	Velocidade de propagação do pulso de tensão no cabo elétrico
V_{cc}	Amplitude da tensão interna do conversor de frequências
V_{cc_interm} ..	Amplitude da tensão ajustada do nível intermediário do conversor de frequências de três níveis
V_{interm}	Amplitude do pulso no cabo elétrico, emitido pelo nível de tensão intermediário ajustado do conversor de frequências de três níveis
V_{mRP}	Amplitude da tensão no motor em regime permanente
V_p	Amplitude da tensão do pulso no cabo elétrico
Z_c	Impedância característica do cabo elétrico
Z_f	Módulo da impedância interna do conversor de frequências
Z_m	Módulo da impedância de entrada do motor
$Z_{m//c}$	Impedância resultante da impedância do motor em paralelo com a impedância de um cabo elétrico
$Z_{m//2c}$	Impedância resultante da impedância do motor em paralelo com as impedâncias de dois cabos elétricos, também em paralelo
Γ_f	Coefficiente de reflexão nos terminais do conversor de frequências
γ_f	Coefficiente transmissão nos terminais do conversor de frequências
Γ_m	Coefficiente de reflexão nos terminais do motor
$\Gamma_{m//c}$	Coefficiente de reflexão nos terminais do motor, quando a impedância do motor e a impedância de um cabo elétrico se encontram em paralelo
γ_m	Coefficiente de transmissão nos terminais do motor
$\gamma_{mc/c}$	Coefficiente de transmissão nos terminais do motor, quando a impedância do motor e a impedância de um cabo elétrico se encontram em paralelo
λ_{fmax_ts}	Comprimento de onda da componente de frequência máxima de subida do pulso do conversor de frequências
λ_{fund}	Comprimento de onda da componente fundamental do pulso do conversor de frequências
λ_{osc}	Comprimento de onda da oscilação do pulso no cabo elétrico

SUMÁRIO

1. OBJETIVO.....	18
2. JUSTIFICATIVA.....	20
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
4. INTRODUÇÃO	34
4.1. Organização do Texto	34
4.2. Propagação e Reflexão de Pulsos e Ondas de Tensão.....	35
4.3. Análise Detalhada da Reflexão de Pulsos e Ondas, e a Formação do Transitório de Sobretensão.....	42
4.4. Modelagem Matemática da Sobretensão nos Terminais do Motor.....	48
4.4.1. Regime Permanente: Análise do Circuito Elétrico	48
4.4.2. Transitório: Análise de Superposição de Pulsos Refletidos no Domínio do Tempo	49
4.4.3. Transitório: Análise de Superposição de Pulsos Refletidos no Domínio das Frequências	55
4.5. Métodos de Redução da Sobretensão.....	59
4.5.1. Filtros Passivos.....	59
4.5.2. Superposição de Pulsos	62
4.5.2.1. Método Precursor – Resistores de Pré-Inserção	63
4.5.2.2. Superposição de Pulsos com Conversor de Frequências de Três Níveis.....	65
4.5.2.3. Superposição de Pulsos com Conversores de Frequências em Paralelo	70
4.5.2.4. Superposição de Pulsos com Conversor de Frequências de Três Níveis, com Nível Intermediário de Tensão Ajustado.....	78
4.6. Modelo de Simulação e Dependência das Frequências	83
4.6.1. Modelo do Cabo Elétrico	83
4.6.2. Modelo do Motor Elétrico.....	85
5. METODOLOGIA	88
5.1. Metodologia Proposta	88
5.2. Simulações	88
5.3. Premissas das Simulações	89
5.4. Parâmetros Quantitativos e Qualitativos para a Avaliação das Curvas de Tensão no Motor	91
6. RESULTADOS.....	94

6.1. Definição do Modelo e dos Parâmetros de Simulação	94
6.1.1. Modelo e Parâmetros do Conversor de Frequências	96
6.1.2. Modelo e Parâmetros do Motor Elétrico.....	97
6.1.3. Modelo e Parâmetros do Cabo Elétrico	98
6.1.3.1. Comprimento do Cabo e Número de Segmentos do Modelo π	99
6.1.4. Comparação Preliminar Entre o Modelo Simplificado e o Modelo Completo de Simulação	102
6.2. Avaliação da Sobretensão	105
6.3. Avaliação da Redução da Sobretensão com Filtros Passivos	110
6.4. Avaliação da Redução da Sobretensão por Superposição de Pulsos	114
6.4.1. Avaliação da Sobretensão com Superposição de Pulsos por Conversor de Frequências de Três Níveis	114
6.4.2. Avaliação da Sobretensão com Superposição de Pulsos com Conversor de Frequências de Três Níveis, com Nível Intermediário de Tensão Ajustado	117
6.4.3. Avaliação da Sobretensão com Superposição de Pulsos com Conversores de Frequências em Paralelo.....	119
6.5. Avaliação Comparativa Preliminar.....	124
6.5.1. Avaliação Preliminar dos Métodos de Redução da Sobretensão.....	125
6.5.2. Avaliação Comparativa Preliminar dos Parâmetros Obtidos nas Simulações..	126
6.6. Otimização dos Métodos de Redução da Sobretensão e dos seus Parâmetros	128
6.6.1. Otimização do Intervalo de Tempo Entre o Disparo dos Pulsos	128
6.6.2. Otimização do Nível Intermediário de Tensão do Conversor de Três Níveis ..	131
6.7. Avaliação Comparativa.....	132
7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	136
8. CONCLUSÕES	140
8.1. Propostas de Trabalhos Futuros	142
8.1.1. Otimização do Número de Segmentos π para a Representação dos Cabos.....	142
8.1.2. Avaliação de Métodos Híbridos	142
8.1.3. Avaliação de Diferentes Combinações de Pulsos.....	143
8.1.4. Análise Teórica da Otimização de Parâmetros	144
8.1.5. Análise da Aplicabilidade dos Métodos de Redução de Sobretensão em Configurações Convencionais de Conversores de Frequências	144
9. REFERÊNCIAS	146
APÊNDICE A – Análise Bibliométrica	150

1. OBJETIVO

O trabalho proposto tem como principal objetivo discutir e avaliar metodologias de redução de sobretensão nos terminais de motores elétricos acionados por conversores de frequência. Para isso, diferentes configurações de acionamento, arranjos de conversores e estratégias de chaveamento serão estudadas e simuladas.

As estratégias avaliadas terão foco na redução dos pulsos refletidos através dos cabos elétricos por meio da superposição proposital de pulsos, que causem interferências destrutivas.

Para fins de avaliação e comparação, métodos passivos de redução de sobretensão também serão analisados e simulados, como, por exemplo, o uso de filtro na saída do conversor e filtro nos terminais do motor.

A avaliação se dará por comparações qualitativas e quantitativas de todos os métodos de redução de sobretensão analisados, apontando vantagens e desvantagens de cada um deles.

2. JUSTIFICATIVA

Os conversores elétricos de potência, em especial os conversores de frequência, são amplamente empregados na indústria para acionamento de motores elétricos devido à combinação de diversos fatores atrativos, dentre eles, menciona-se: simplicidade, flexibilidade, alto desempenho e excelente relação custo/benefício.

A redução dos custos dos conversores de frequência, inclusive, impulsionou a adoção de motores elétricos, até então pouco utilizados na indústria, em razão da dificuldade do controle de sua velocidade, como é o caso dos motores síncronos a relutância e os motores síncronos a ímãs permanentes. Os conversores de frequência possibilitam o controle de velocidade desses motores de forma simples e flexível.

Predominantemente, o acionamento de motores por conversores de frequência na indústria é realizado por intermédio de um cabo elétrico que conecta a fonte (o conversor de frequências) à carga (o motor). Isso ocorre por ser muito comum concentrar os conversores de frequência em salas elétricas com painéis elétricos protegidos – e por vezes climatizados – a uma distância segura do ambiente industrial onde estão posicionados os motores. O intuito é proteger os componentes eletrônicos de ambientes inadequados para o seu bom funcionamento e durabilidade, seja por excesso de umidade, altas temperaturas ou presença de poeira e gases. Em casos mais específicos, como plataformas de exploração de petróleo e plantas nucleares, muitos motores se encontram em postos remotos ou mesmo em áreas expostas à contaminação e/ou altos índices de radiação. Nesses casos é inviável manter os conversores de frequência perto dos motores.

A alimentação de motores por conversores de frequência através de cabos elétricos apresenta interfaces de diferentes impedâncias características: fonte-cabo e cabo-carga. Os cabos elétricos são o meio de propagação das ondas ou pulsos de tensão do conversor ao motor. Em geral, os tempos de subida dos pulsos dos conversores são muito baixos. Essas características combinadas garantem todas as condições necessárias, para a ocorrência de reflexão de ondas ou pulsos nas duas interfaces citadas.

As repetidas reflexões de pulsos nas interfaces do cabo geram o transitório de sobretensão nos terminais do motor (PAUL, 2006). Quanto mais lenta ou mais demorada for a propagação dessas ondas através do cabo, maior será a duração do transitório e mais danosos serão os efeitos da sobretensão nos terminais e enrolamentos do motor (KORHONEN et al.,

2010). Outro parâmetro que possui influência importante na sobretensão é o tempo de subida dos pulsos das chaves semicondutoras do conversor de frequências: quanto menor esse tempo de subida, maior a amplitude da sobretensão gerada nos terminais do motor (PAUL, 2006). Os fabricantes de fontes chaveadas têm reduzido consideravelmente o tempo de chaveamento das fontes, no intuito de reduzir as perdas por chaveamento, em consequência, o tempo de subida dos pulsos é cada vez menor (YI; MURTHY; WEI, 2016). Um grande salto tecnológico nesse sentido pode ser observado na substituição dos *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) de silício (Si) por *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET) de carbeto de silício (SiC) (DE CARO et al., 2017). Por outro lado, a necessidade de avaliação do fenômeno de sobretensões nestes sistemas ganha substancial importância atualmente.

Os principais danos causados pela sobretensão nos terminais e nos enrolamentos dos motores são *stress* e falha prematura do sistema de isolamento, devido à amplitude da sobretensão, interferência eletromagnética devido à oscilação em alta frequência da sobretensão causada pela reflexão de pulsos (BONNETT, 1997), e o aumento do nível de tensão de modo-comum (HANIGOVSKI; POULSEN; BLAABJERG, 2004; MOREIRA et al., 2005). Adicionalmente, efeitos secundários da sobretensão como o aumento da interferência eletromagnética conduzida, correntes de fuga para a terra e correntes de modo-comum através dos mancais e dos rolamentos, também podem causar danos graves ao motor e a todo o sistema elétrico conectado neste. (HANIGOVSKI; POULSEN; BLAABJERG, 2004) elenca esses efeitos secundários na cadeia de causas e efeitos representada na Figura 1.

Falhas no sistema de isolamento inviabilizam o bom funcionamento do motor e podem, por exemplo, ser a causa da parada de funcionamento de sistemas críticos de uma planta industrial. Enfatiza-se, desta forma, a importância da adoção de estratégias para redução da sobretensão nos terminais dos motores, mantendo-os mais protegidos de falhas de isolamento.

Adicionalmente, é necessário estudar e avaliar métodos de redução da sobretensão que sejam flexíveis e que possam se adequar aos novos cenários que serão impostos pelos avanços tecnológicos recentes e futuros na área de eletrônica de potência.

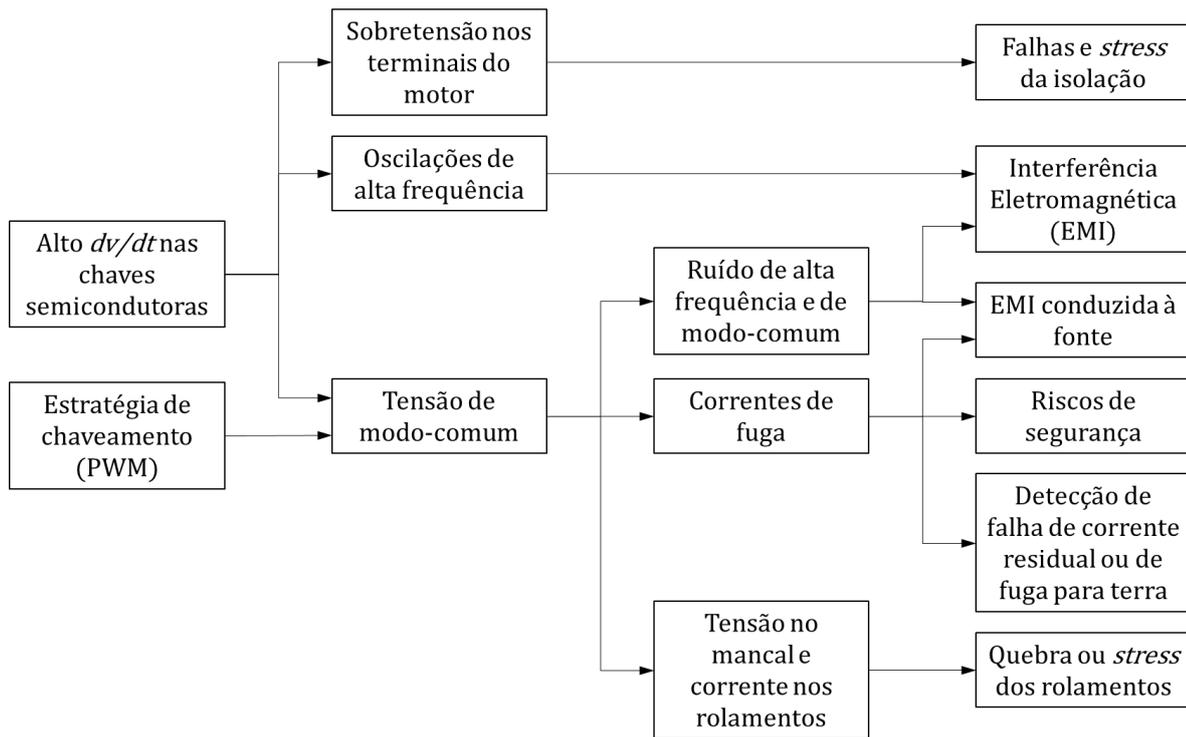


Figura 1 - Cadeia de causas e efeitos da estratégia de chaveamento e da alta variação dv/dt

Fonte: Adaptado de (HANIGOVSKI; POULSEN; BLAABJERG, 2004).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na literatura científica muito se discutiu sobre os efeitos das sobretensões geradas nos terminais de motores alimentados por fontes chaveadas e conversores de frequência. O mais evidente desses efeitos é o impacto da sobretensão no sistema de isolamento dos motores. Para atenuação da sobretensão, os métodos passivos foram exaustivamente discutidos. Por outro lado, uma discussão mais recente acerca de métodos ativos por superposição de pulsos, demonstra que estes apresentam grande potencial, tanto em termos de atenuação das sobretensões, como redução das perdas geradas pelos elementos passivos. A discussão sobre esses métodos ativos de redução da sobretensão vem se tornando mais relevante, ao mesmo passo que os dispositivos de acionamento de motores adotam chaves com velocidade e frequência de chaveamento cada vez mais elevadas.

Uma exposição detalhada e didática do processo de reflexão de ondas de tensão em descontinuidades de meios propagação, a sua formulação matemática e a conseqüente formação do transitório de sobretensão estão presentes em (CARDOSO, 2011), capítulo 1, em (PAUL, 2006), capítulo 4, e em (ZANETTA, 2003) capítulos 6 e 7.

Em (PERSSON, 1992) uma discussão detalhada do efeito transitório da sobretensão é apresentada. As conclusões acerca do tempo de subida dos pulsos gerados por modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* - PWM) e seus impactos no sistema de isolamento dos motores indicam que tempos de subida de pulso inferiores ao dobro do tempo de propagação do pulso no cabo ocasionam uma reflexão completa do pulso na interface cabo-terminais do motor, potencializando o efeito das sobretensões. Além disso, várias razões são apresentadas para a inviabilidade de utilização de sistemas especiais de isolamento em motores para aplicações convencionais na indústria. Sob o ponto de vista dos fabricantes, as normas regulatórias são muito restritivas, e há grande dificuldade de melhoria da isolamento espira-espira dos enrolamentos dos motores. Sob o ponto de vista do usuário, haveria grande aumento da dificuldade do gerenciamento de peças de reposição e operações de manutenção preventiva, além de grande custo gerado por tempo de parada de produção decorrente da substituição de motores convencionais por motores com sistema de isolamento especial.

A discussão sobre os efeitos da sobretensão e da sua relevância, em razão do aumento da adoção de conversores com chaves semicondutoras de alta velocidade de chaveamento na indústria, é aprofundada em (SAUNDERS et al., 1996). É dado destaque para o coeficiente de

reflexão no motor, parâmetro que define a amplitude do pico da sobretensão, e que é uma relação da diferença entre a impedância característica do cabo elétrico e a impedância de entrada do motor. Além disso, são apresentados e analisados parâmetros de impedâncias características de cabos de diferentes seções e impedâncias de entrada dos motores de indução de diferentes portes. A análise dos dados evidencia que a impedância característica dos cabos não varia muito em relação à seção desses cabos: seções que variam de 1 a 240 milímetros quadrados variam a impedância característica de 80 a 180 ohms. A impedância de entrada dos motores de indução apresenta maior variação em relação ao seu porte: para uma variação de potência de 5 a 500 hp, a impedância de entrada varia de 5000 a 400 ohms. Dessa forma, a diferença entre as impedâncias de motores de pequeno porte e cabos de seção pequena é muito maior que a diferença entre as impedâncias de motores de grande porte e cabos de seção grande, o que implica em efeitos mais graves da sobretensão em motores de pequeno porte, sendo o pico da sobretensão próximo de duas vezes a tensão do pulso de acionamento do motor. Além disso, é apresentado um agravante no acionamento de motores de grande porte, que comumente utilizam cabos em paralelo. Isso reduz o valor da impedância característica do conjunto de cabos, aumentando a diferença do valor das impedâncias do cabo e do motor, intensificando a sobretensão.

Os estudos apresentados em (MELHORN; TANG, 1997) discutem também o sistema de isolamento nos estatores de motores gaiola de esquilo e o impacto dos transitórios de sobretensão nesse sistema de isolamento. São apresentados casos em que há necessidade de utilização de filtros passivos para atenuação das sobretensões. O autor defende que cada caso deve ser analisado individualmente, mas que uma solução prática é a adoção de um filtro RC nas proximidades dos terminais do motor.

Uma visão detalhada do sistema de isolamento dos motores, e a classificação padronizada pelas normas NEMA MG1 Part 30 e MG1 Part 31 desses sistemas de isolamento é apresentada em (BONNETT, 1997). O autor discute os impactos elétricos, térmicos, mecânicos e ambientais nos sistemas de isolamento. A discussão progride para as possíveis falhas apresentadas pelo sistema de isolamento (espira-espira, enrolamento-enrolamento, fase-fase e enrolamento-terra), bem como o efeito corona e potenciais descargas parciais.

Ainda a respeito das descargas parciais espira-espira e fase-fase, (MELFI et al., 1998) as estuda aprofundando a análise da distribuição da sobretensão através das espiras dos enrolamentos do motor de indução e observa que, quando acionado por pulsos com curto tempo de subida, menores do que um microssegundo, durante o transitório de acionamento, ocorre

entre as primeiras espiras dos enrolamentos uma oscilação de tensão da grandeza de dezenas de megahertz, com amplitude até quatro vezes maior do que a diferença de tensão entre essas espiras com o motor em regime permanente. Essas observações corroboram com as medições apresentadas em (NARANG et al., 1989). Após a penetração desse pulso no enrolamento, e o fim desse transitório, essa oscilação nas primeiras espiras não é mais observada. Para pulsos com tempo de subida maiores do que alguns microssegundos, essa oscilação não é observada. Esse fenômeno evidencia reflexões do pulso no interior dos enrolamentos, gerando essa oscilação e esse gradiente de tensão entre espiras. Esse aumento da amplitude da tensão entre espiras pode desencadear descargas parciais entre enrolamentos de fases subjacentes, e em casos limites, entre espiras de um mesmo enrolamento.

Os resultados apresentados por (MELFI et al., 1998) são posteriormente reforçados por novos experimentos, cujos resultados são apresentados por (MIRAFZAL et al., 2007), que avança propondo um modelo de matemático que computa a capacitância entre as espiras em fenômenos de frequência elevada.

Os efeitos secundários da sobretensão e sua oscilação em alta frequência são abordados por (HANIGOVSKI; POULSEN; BLAABJERG, 2004). Através de uma representação gráfica de cadeia de causas e efeitos, destacam-se os seguintes efeitos secundários: tensão e corrente de modo-comum, que aliados ao alto dv/dt da sobretensão geram interferências eletromagnéticas irradiadas e conduzidas, e tensão no eixo do motor, que origina correntes de fuga para o aterramento da carcaça do motor que danificam os enrolamentos do eixo. Além disso, é proposto um filtro RLC nos terminais do conversor, que é conectado em estrela e ligado aos terminais positivo e negativo do barramento CC do conversor através de dois diodos. Esse filtro atenua de forma satisfatória a sobretensão no motor testado.

A fim de propor modelos de simulação mais adequados à representação da reflexão de pulsos e a sobretensão resultante dessas reflexões, (SKIBINSKI et al., 1998) apresentam uma investigação detalhada dos parâmetros do conversor de frequências, do cabo e do motor. A partir dessa investigação, é apresentada uma boa gama de dados técnicos desses componentes. Por fim, é apresentada a construção de um modelo de simulação no software SimuLink® com razoável acurácia e pouco esforço computacional, e que computa os principais efeitos de alta frequência da sobretensão.

Ainda a respeito dos estudos de modelos computacionais mais adequados para a simulação da sobretensão gerada por reflexões de pulsos, pode-se encontrar modelos para a representação de cabos e motores em alta frequência em (MOREIRA et al., 2001, 2002, 2005),

que descrevem com boa precisão o fenômeno físico e apresentam pouco esforço computacional. Além disso, os autores propõem e avaliam o uso de diferentes tipos de filtros passivos nos terminais do conversor e nos terminais do motor, concluindo que os filtros nos terminais do conversor são efetivos quando utilizados a fim de reduzir o tempo de subidas dos pulsos, a relação dv/dt ; e os filtros posicionados nos terminais do motor são efetivos quando dimensionados para reduzir a impedância vista a partir dos terminais do motor em alta frequência. Através de avaliação da diferença de tensão entre espiras de uma mesma fase do motor, os autores, também, apontam a ocorrência de reflexão de pulsos dentro dos enrolamentos do motor, em casos em que o tempo de subida desses pulsos é muito curto, o que, também, gera maior corrente de modo-comum. A proposta para redução dessas reflexões internas aos enrolamentos é o uso de filtros RLC na saída do conversor para aumentar o tempo de subida dos pulsos. Os autores, também, alertam para as possíveis diferenças de resposta na redução da sobretensão obtida por filtros passivos, em razão da condição inicial de carga de componentes, como em capacitores, e a condição inicial de campo de componentes, como em indutores.

Em diversas publicações (AMARIR; AL-HADDAD, 2006a, 2006b, 2008a, 2008b, 2008c, 2008d, 2008e, 2010) avançam na modelagem matemática e no desenvolvimento de uma ferramenta de simulação via SimuLink®, para descrever o fenômeno transitório em alta frequência da reflexão de pulsos e sobretensão em motores acionados por conversores de frequência através de longos cabos elétricos. A análise tem o intuito de descrever o fenômeno e identificar os parâmetros críticos para o sistema, como o comprimento máximo do cabo e a frequência máxima de chaveamento, para que o motor possa operar dentro de suas especificações, sem sobrecarregar seu sistema de isolamento, e cumprindo com as especificações normativas de ruídos causados por correntes de modo-comum e correntes de modo-diferencial.

Os filtros passivos para atenuação da sobretensão são amplamente abordados pela literatura científica. Em (VON JOUANNE et al., 1996) é apresentado o dimensionamento e a aplicação de filtros *shunt* de primeira e de segunda ordem nos terminais do motor que apresentam considerável redução do pico da sobretensão a da oscilação transitória desta. Em contrapartida, a análise de perdas nos filtros demonstra que a adição desses elementos passivos ao sistema acarreta aumento considerável nas perdas totais. Em (VON JOUANNE; ENJETI, 1997) são apresentados métodos mais diretos do dimensionamento de filtros RLC nos terminais do conversor de frequências e filtros shunt de primeira ordem nos terminais do motor.

Uma proposta de método de dimensionamento e aplicação de um circuito de amortecimento RLC, como filtro nos terminais do motor é apresentado por (AOKI; SATOH;

NABAE, 1999). Os resultados demonstram boa atenuação da sobretensão e sua oscilação, no entanto também acarretam perdas adicionais ao sistema.

Em (LEE; NAM, 2004) são propostos procedimentos de dimensionamento de um filtro passivo RLC em cada uma das fases, nos terminais do conversor de frequências, e de um filtro RC em cada uma das fases, nos terminais do motor. Os filtros conseguem atenuar de forma satisfatória a sobretensão e diretivas simples são expostas para o bom dimensionamento desses filtros. De forma semelhante, (AKAGI; MATSUMURA, 2011) propõem a utilização de filtros passivos RLC nos terminais do conversor de frequências, obtendo boa atenuação das sobretensões.

Em (YUEN; CHUNG; CHEUNG, 2012) é proposto um filtro ativo aplicado aos terminais do motor, que apresenta resultado de atenuação da sobretensão tão efetivo quanto os resultados dos filtros passivos RC ou RLC, e a melhoria causada pelo filtro nas correntes de modo-comum. No entanto, do ponto de vista de eficiência energética, apresenta melhor resultado.

Um método de redução da sobretensão em longas linhas de transmissão, que faz uso do mecanismo de superposição de ondas refletidas, é o método de adição de um resistor de pré-inserção no momento da energização das linhas de transmissão. Em (D'AJUZ, 1987), capítulo 7, e em (ZANETTA, 2003), capítulo 11, esse processo é descrito de forma didática. Um mecanismo semelhante, de superposição de pulsos refletidos, porém em transitórios muito mais rápidos, é o adotado nos métodos de redução de sobretensão em motores, com o uso de estratégias de chaveamento dos conversores de frequência para gerar a superposição dos pulsos refletidos. Pode-se considerar que o método do resistor de pré-inserção é o precursor dos métodos que utilizam estratégias de chaveamento dos conversores de frequência para gerar superposição de pulsos.

De forma análoga ao método do resistor de pré-inserção, (LEE; NAM, 2002) propõem uma estratégia de superposição dos pulsos refletidos, utilizando um único conversor de frequências de pulsos de três níveis. A lógica é tratar cada nível do pulso como o envio de um pulso distinto, e disparar cada um desses dois pulsos em um intervalo de tempo definido, de forma que o disparo do segundo pulso coincida com o momento em que o primeiro pulso está sendo refletido nos terminais do conversor (em momento posterior àquele em que esse pulso foi refletido pela primeira vez nos terminais do motor). Nesse momento, é criada uma superposição de um pulso com polaridade positiva (emitido pelo conversor) e um pulso com polaridade negativa (refletido nos terminais do conversor), atenuando a amplitude do pulso

refletido que se propaga no cabo e, conseqüentemente, reduzindo a amplitude da sobretensão. Essa estratégia de chaveamento, com intervalo de tempo definido entre os pulsos, depende do conhecimento prévio do tempo de propagação dos pulsos no cabo. Em geral, o tempo entre os pulsos é duas vezes o tempo de propagação dos pulsos através do cabo, que é o intervalo de tempo que o primeiro pulso leva para ir do conversor até o motor, e após ser refletido nos terminais do motor, ir do motor até os terminais do conversor. Esse método apresentou atenuação considerável das sobretensões nos terminais do motor sem aumentar as perdas do sistema.

Em (LEE, 2006), ainda utilizando conversores de frequências de pulsos de três níveis, é apresentado por meio de formulação matemática e de simulações que, em condições ideais, e sendo possível ajustar a amplitude do nível de tensão intermediário do pulso, é possível anular completamente a sobretensão. No entanto, essa análise desconsidera os aspectos capacitivos e indutivos dos cabos e da propagação dos pulsos nos cabos, e tem um sistema de controle muito mais complexo do que o método apresentado anteriormente. Além disso, não é levado em conta um ponto importante ressaltado por (NAUMANEN et al., 2010): a velocidade de propagação de um pulso em um cabo e a forma de onda do pulso refletido, além de depender de seus parâmetros elétricos, pode depender da frequência do pulso. O cabo em si pode apresentar um comportamento de filtro passa-baixa, podendo, em frequências elevadas, distorcer ou retardar os pulsos. A variação de velocidade de propagação do pulso pode ser pequena dentro da banda de frequências de um conversor de frequências comercial, no entanto, a oscilação dos pulsos refletidos (sobretensão) apresenta frequências bem mais elevadas que estas. Nesse contexto, pequenas diferenças na velocidade de propagação dos pulsos refletidos podem inviabilizar a completa atenuação da sobretensão proposta por (LEE, 2006).

Em (KORHONEN et al., 2010) os métodos de atenuação de sobretensão mais discutidos pela literatura científica, até então, são apresentados e comparados com um método de redução da sobretensão proposto pelos autores. Os métodos que servem como referência de comparação ao método proposto pelos autores são: indutores de linha, filtros dv/dt , filtros senoidais e terminadores de cabos; todos adicionam elementos passivos ao sistema e aumentam as perdas totais. O método proposto pelos autores substitui o conversor de frequência de três níveis utilizado por (LEE; NAM, 2002) por conversores de frequências de dois níveis trabalhando em paralelo e com estratégia de chaveamento conjunta. O sincronismo dos disparos dos conversores em paralelo é realizado por um controlador baseado em *Field-Programmable Gate Array* (FPGA). Novamente, os pulsos são separados por intervalos de tempo que são múltiplos

de duas vezes o tempo de propagação dos pulsos no cabo, com exceção dos arranjos que utilizam número ímpar de conversores em paralelo, para esse último caso alguns pulsos são separados por um intervalo de tempo de uma vez o tempo de propagação dos pulsos no cabo e outros são separados por intervalos de duas vezes o tempo de propagação dos pulsos no cabo. Essa configuração apresenta uma característica interessante, quando o primeiro pulso alcança os terminais do motor pela primeira vez, as impedâncias dos cabos que ligam o motor aos conversores, que ainda não emitiram nenhum pulso, estão em paralelo com a impedância do motor, dessa forma, o pulso que chega ao motor enxerga uma impedância menor do que a impedância do motor (considerando a impedância dos cabos menor do que a impedância do motor). Assim, tanto o pulso refletido, como a sobretensão apresentam amplitude reduzida. Essa configuração, também, apresentou atenuação considerável das sobretensões nos terminais do motor, sem aumentar as perdas do sistema.

Em (DE CARO et al., 2017) é apresentado um método utilizando dois conversores de frequência para o acionamento de um motor de enrolamentos abertos (*open-end*), em que cada conversor é conectado a um polo do enrolamento do motor. A estratégia de chaveamento é semelhante à adotada por (KORHONEN et al., 2010) com os pulsos dos conversores deslocados, em razão do tempo de propagação do pulso no cabo, e alcança redução satisfatória na sobretensão nos terminais do motor.

Uma discussão a respeito da sensibilidade do método proposto por (KORHONEN et al., 2010) – que utiliza dois conversores de frequência em paralelo – às possíveis variações na impedância dos cabos é apresentada em (DE PAULA DOS SANTOS; SARTORI, 2018), artigo desenvolvido dentro desse projeto de pesquisa. A diferença nos valores de corrente que circulam em cada um dos cabos e de potência dissipada em cada um deles, também, é abordada neste artigo.

(XIONG; ZHANG; VON JOUANNE, 2018) discutem as condições em que a sobretensão pode alcançar amplitude superior a duas vezes a amplitude do pulso, e propõem um método de redução semelhante aos métodos de superposição de pulsos. Porém, o parâmetro monitorado é a fase da curva de sobretensão e não os tempos de trânsito dos pulsos nos cabos.

Um comparativo de custos entre a adoção dos principais tipos de filtros passivos utilizados para a redução de sobretensão, e o uso de dois conversores de frequência em paralelo é mostrado em (BURKART; KOLAR, 2017). O comparativo é feito utilizando um conversor de frequências trifásico de 10 kW, apresentando vantagens, tanto em custo, quanto em volume,

quando da adoção de métodos ativos de redução de tensão, utilizando-se conversores de frequência em paralelo.

Um estudo ainda mais recente, apresentado por (HAIDER et al., 2020), compara o estado da arte de sistemas de acionamento de motores com variação de velocidade e acionamento por conversores de frequência dotados de IGBTs de Si e MOSFETs de SiC. O comparativo avalia alguns métodos de redução de tempo de subida dos pulsos (dv/dt), são eles: métodos passivos utilizando filtros LC e RLC na saída do conversor, método ativo utilizando um capacitor de retorno de Miller entre a porta (*gate*) e o dreno da chave semicondutora e o método híbrido, que combina um filtro passivo LC na saída do conversor de frequências e a estratégia de chaveamento de pulsos defasados de acordo com o tempo de propagação dos pulsos no cabo para a redução ou supressão dos pulsos refletidos. A faixa de potência avaliada é de 10 kW e a limitação proposta de gradiente de subida dos pulsos é de 6 V/ns. Uma análise da eficiência energética de todo o conjunto, também, é apresentada. Ambos os métodos alcançam boa redução de sobretensão, conseguindo reter a curva de subida dos pulsos no gradiente máximo estabelecido. Além disso, todas as configurações com MOSFET SiC, adotando qualquer um dos filtros, obteve um ganho de eficiência em relação às configurações com IGBT Si. As configurações com IGBT Si alcançam eficiência máxima de 98,3%. A melhor configuração utilizando MOSFET SiC foi a que utiliza o filtro híbrido e alcançou eficiência de 99,0%.

Uma breve análise comparativa dos métodos que utilizam da superposição de pulsos para a redução da sobretensão é apresentado em (DE PAULA DOS SANTOS; SARTORI, 2020), incluindo, ainda, uma análise da influência do intervalo de tempo entre os disparos dos pulsos e do comprimento do cabo, no valor de pico da sobretensão. Este artigo foi desenvolvido no decorrer desse projeto de pesquisa.

De forma geral, a atenuação da sobretensão transitória em motores por meio de métodos ativos de superposição de pulsos é um campo que deve ser mais explorado, principalmente estudando-se novos arranjos físicos e novas estratégias de chaveamento conjunto dos conversores de frequência.

O presente trabalho tem por objetivo avaliar e comparar os métodos atuais de atenuação da sobretensão nos motores acionados por conversores de frequência, com foco principal nos métodos ativos que se utilizam de estratégias de chaveamento de pulsos para originar superposições de interferência destrutiva em pulsos refletidos, como propostos por (LEE;

NAM, 2002), (LEE, 2006), (KORHONEN et al., 2010), (NAUMANEN et al., 2010), (DE CARO et al., 2017), (DE PAULA DOS SANTOS; SARTORI, 2018) e (HAIDER et al., 2020).

O APÊNDICE A apresenta uma breve análise bibliométrica das referências utilizadas no presente trabalho, por meio de mapas bibliométricos.

4. INTRODUÇÃO

4.1. Organização do Texto

Essa subseção apresenta a forma como o texto está organizado nas próximas Seções.

Nessa Seção, serão apresentados os aspectos teóricos mais relevantes para o estudo da sobretensão em motores elétricos acionados por conversores de frequências e os principais métodos para a sua redução, incluindo:

- Uma breve revisão do processo de propagação e reflexão de ondas de tensão em cabos elétricos (subseção 4.2);
- A exposição detalhada do processo de reflexões sequenciais de um pulso em um cabo elétrico que conecta um motor à um conversor de frequências e a consequente formação do transitório da sobretensão (subseção 4.3);
- A modelagem matemática da sobretensão em regime permanente e durante o transitório, no domínio do tempo e no domínio das frequências (subseção 4.4);
- A apresentação de métodos para a redução da sobretensão, agrupados em métodos que utilizam filtros passivos (solução amplamente utilizada na indústria) e métodos que utilizam a superposição de pulsos (subseção 4.5); e
- Uma breve análise dos modelos que poderão ser adotados nas simulações e a comparação entre os diferentes níveis de simplificação desses modelos (subseção 4.6).

A metodologia a ser adotada na investigação do processo de redução da sobretensão e a influência dos parâmetros do sistema na eficácia dessa redução da sobretensão é apresentada na Seção 5, página 88. Nas subseções são apresentadas:

- Como serão realizadas as simulações e uma breve lista das simulações que deverão ser conduzidas na investigação proposta (subseção 5.2);
 - As premissas adotadas para as simulações e os modelos que serão utilizados nestas simulações (subseção 5.3); e
 - Os parâmetros quantitativos e qualitativos que deverão ser observados nas curvas de sobretensão obtidas por simulação, a fim de avaliar os métodos de redução da sobretensão individualmente e comparativamente (subseção 5.4).
-

Os resultados são apresentados na Seção 6, página 94. As subseções apresentam:

- A definição dos parâmetros dos modelos de simulação (subseção 6.1);
- A avaliação dos resultados de simulação para a sobretensão sem a aplicação de qualquer método de redução dessa sobretensão (subseção 6.2);
- A avaliação dos resultados das simulações com filtros passivos para a redução da sobretensão (subseção 6.3);
- A avaliação dos resultados das simulações que utilizam os métodos de superposição de pulsos para redução da sobretensão (subseção 6.4);
- Uma avaliação comparativa preliminar do desempenho dos métodos de redução da sobretensão simulados (subseção 6.5);
- A otimização de parâmetros dos métodos de superposição de pulsos para redução da sobretensão e a avaliação dos resultados das simulações (subseção 6.6); e
- Uma avaliação comparativa dos resultados finais de desempenho dos métodos de redução da sobretensão simulados (subseção 6.7).

A Seção 7, página 136, apresenta a discussão dos resultados.

Na Seção 8, página 140, são apresentadas as conclusões e as sugestões de estudos futuros.

A Seção 8.1.4, página 144, contém a lista de referências bibliográficas.

O APÊNDICE A, página 150, apresenta uma breve análise bibliométrica das referências utilizadas no presente trabalho, por meio de mapas bibliométricos.

4.2. Propagação e Reflexão de Pulsos e Ondas de Tensão

Em diversas aplicações industriais os motores elétricos são acionados por conversores de frequência através de longos cabos elétricos. Esses cabos permitem a propagação de ondas e pulsos de tensão, mas, também, possibilitam a sua respectiva reflexão nas interfaces carga-cabo e fonte-cabo, podendo gerar sobretensão nessas interfaces, destacadamente nos terminais do motor.

A Figura 2 apresenta um desenho esquemático da configuração de acionamento de motor elétrico, que utiliza um conversor de frequências com um cabo elétrico de alimentação.

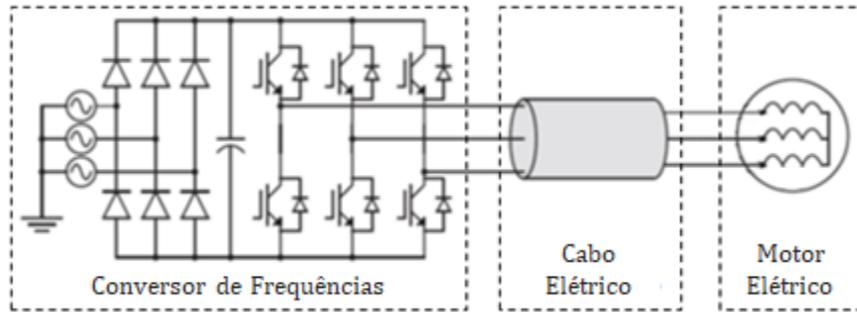


Figura 2 - Configuração básica do acionamento de um motor por um conversor de frequências
 Fonte: Adaptado de (KORHONEN et al., 2010).

Analisando de forma mais detalhada as causas da sobretensão nos terminais dos motores elétricos, observa-se a necessidade do estudo do fenômeno de reflexão de ondas. Essas reflexões de ondas em cabos elétricos de alimentação são análogas ao fenômeno amplamente estudado de reflexão de ondas em linhas de transmissão de energia elétrica (PAUL, 2006). Dessa forma, é possível utilizar parte da teoria de ondas viajantes, linhas de transmissão e seus modelos para efeito de estudo da reflexão de ondas em cabos elétricos de alimentação de motores.

É importante destacar que nem todo pulso ou onda que chega nos terminais de um motor é refletido, e que mesmo quando a reflexão ocorre, ela pode ocorrer de forma completa ou parcial. São necessárias duas condições para a ocorrência da reflexão nos terminais do motor:

- i. A existência de uma descontinuidade entre meios que possuam impedâncias distintas; e
- ii. que a relação entre o tempo de propagação da onda nesse meio (t_p) e o tempo de subida da onda (t_s) seja maior do que 0,5.

Se o tempo de propagação da onda no meio é maior do que metade do tempo de subida da onda, então, uma reflexão completa da onda ocorrerá (PERSSON, 1992) na descontinuidade entre os meios. Uma onda de amplitude proporcional à amplitude da onda original será refletida. Isso equivale a dizer que, sempre que a relação entre o tempo de subida e o tempo de propagação for menor do que dois ($t_s/t_p < 2$), uma reflexão completa ocorrerá. Quando essa relação apresentar valores maiores do que dois, a reflexão será parcial. Assim, a onda parcialmente refletida será proporcionalmente menor do que a onda completamente refletida.

Na interface entre dois meios de impedâncias distintas, como é o caso dos terminais do motor (interface entre o cabo elétrico e os enrolamentos internos do estator do motor) ocorre o fenômeno de reflexão de ondas, que pode amplificar, momentaneamente, a amplitude da onda,

resultando em uma sobretensão que pode chegar ao valor de pico igual ao dobro da tensão original da onda. No momento da reflexão, a onda incidente V^+ , que viaja pelo meio de impedância característica do cabo Z_c , encontra a interface de impedância de entrada do motor Z_m . Nesse momento uma onda V^- é refletida. As tensões e correntes, nesse momento de ajuste à interface de impedâncias distintas, são:

$$\begin{aligned} V_m &= V^+ + V^- \\ I_m &= I^+ + I^- \end{aligned} \quad (1)$$

De onde é possível estabelecer a seguinte equação:

$$\frac{V_m}{Z_m} = \frac{V^+}{Z_c} - \frac{V^-}{Z_c} \quad (2)$$

A sobretensão pode ser determinada através do coeficiente de reflexão, que é uma relação direta entre a amplitude das ondas incidente e refletida, V^+ e V^- , e uma relação indireta entre as impedâncias características dos dois meios, Z_m e Z_c (PAUL, 2006; CARDOSO, 2011). A Equação (3) descreve o coeficiente de reflexão Γ_m , na interface entre o cabo e o motor.

$$\Gamma_m = \frac{V^-}{V^+} = \frac{Z_m - Z_c}{Z_m + Z_c} \quad (3)$$

Considerando Z_m e Z_c maiores do que zero, Γ_m será sempre maior do que -1 e menor do que 1 . Em geral, as impedâncias dos enrolamentos dos motores são bem maiores do que as impedâncias dos cabos elétricos. Dessa forma, esse coeficiente de reflexão nos terminais dos motores é um valor geralmente próximo de 1 .

O fenômeno de reflexão de uma onda de tensão nos terminais do motor pode ser ilustrado, de forma simplificada, conforme apresentado na Figura 3, sendo t_0 um instante anterior à incidência da onda de amplitude de pico A na interface, t_1 o instante da incidência, e t_2 um instante posterior à incidência.

A sobretensão gerada pela reflexão de uma onda de tensão em uma interface de meios de impedâncias distintas é uma superposição da onda original (onda incidente) com a onda refletida. Essa, também, é a onda transmitida ao motor (ZANETTA, 2003; CARDOSO, 2011),

e o coeficiente que a descreve pode ser definido como o coeficiente de transmissão da onda γ_m , como apresentado na equação a seguir:

$$\gamma_m = (1 + \Gamma_m) = \frac{2Z_m}{Z_m + Z_c} \tag{4}$$

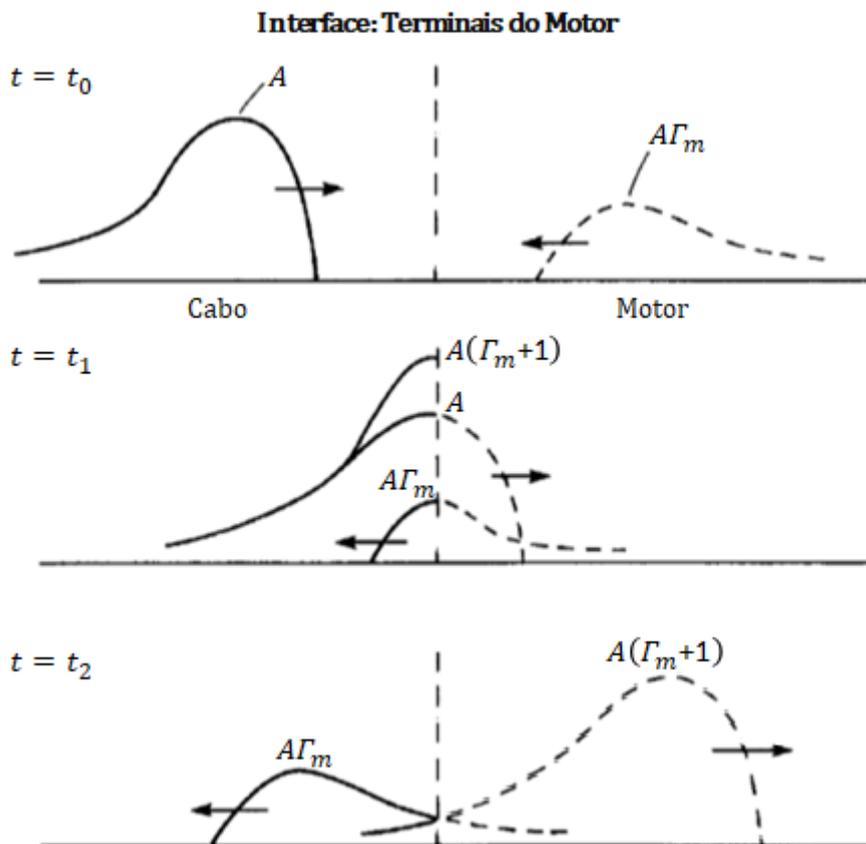


Figura 3 - Fenômeno de sobre-tensão nos terminais do motor por reflexão de ondas

Fonte: Adaptado de (PAUL, 2006).

A fim de simplificar a notação dos coeficientes de reflexão e de transmissão de ondas neste trabalho, adotou-se as letras gregas gama maiúsculo para o coeficiente de reflexão (Γ) e gama minúsculo para o coeficiente de transmissão (γ). No caso de um motor alimentado por um conversor de frequências através de um cabo elétrico longo, cuja amplitude do pulso que é propagado pelo cabo elétrico (onda incidente) seja V_p , a onda refletida na interface do motor teria amplitude $\Gamma_m V_p$. Dessa forma, conforme a Equação (5) a sobre-tensão nos terminais do motor V_m seria:

$$V_m = V_p + \Gamma_m V_p = V_p(1 + \Gamma_m) = V_p \left(1 + \frac{Z_m - Z_c}{Z_m + Z_c}\right) = V_p \left(\frac{2Z_m}{Z_m + Z_c}\right) \quad (5)$$

Nos casos mais comuns, em que Z_m é muito maior do que Z_c e Γ_m tem valor próximo de 1, a sobretensão nos terminais do motor V_m alcança valores bem próximos do dobro da amplitude do pulso, ou seja, quase $2V_p$ (PERSSON, 1992). Os efeitos de atenuação do pulso transmitidos pelo cabo não serão considerados neste trabalho.

Em valores numéricos, (SAUNDERS et al., 1996) faz a seguinte análise: cabos de 3 ou 4 fios, de diâmetros variando de #18 AWG até 500 MCM, apresentam impedância característica variando de 80 até 180 Ω . A impedância de entrada de motores de indução de potência inferior à 5 hp varia de 2000 até 5000 Ω , motores de potência de 125 hp apresentam impedância de entrada de aproximadamente 800 Ω e motores de 500 hp podem apresentar impedância de entrada de aproximadamente 400 Ω . Como resultado, motores de menos de 5 hp podem apresentar $\Gamma_m \cong 0,95$ e sobretensão de até 1,95 p.u., motores de 125 hp podem apresentar $\Gamma_m \cong 0,82$ e sobretensão de até 1,82 p.u. e motores de 500 hp podem apresentar $\Gamma_m \cong 0,6$ e sobretensão de até 1,6 p.u.. Portanto, em geral, a sobretensão é mais grave em motores de menor porte. Todavia, é importante se atentar ao uso de cabos em paralelo para a alimentação do motor, mais comum em motores de grande porte, uma vez que isso reduz o valor da impedância característica do conjunto de cabos e pode aumentar tanto o valor do coeficiente de reflexão como a sobretensão.

É importante ressaltar que, em razão da impedância interna do conversor de frequências, o pulso que se propaga pelo cabo elétrico não tem a mesma amplitude da tensão do barramento de corrente contínua do conversor, V_{cc} . Como o cabo elétrico se comporta como um meio de propagação, o pulso gerado internamente no conversor tem a tensão dividida entre a impedância interna do conversor (fonte) Z_f e a impedância do cabo, conforme a Equação (6) apresentada a seguir.

$$V_p = V_{cc} \frac{Z_c}{Z_f + Z_c} \quad (6)$$

Uma vez que a onda é refletida nos terminais do motor ela se propaga em direção ao conversor. Nos terminais do conversor (interface entre o conversor e o cabo) a onda é novamente refletida, dessa vez em função do coeficiente de reflexão do conversor, que é uma

relação entre a impedância do cabo e a impedância do conversor vista a partir de seus terminais, descrita na Equação (7), apresentada a seguir:

$$\Gamma_f = \frac{Z_f - Z_c}{Z_f + Z_c} \tag{7}$$

Sendo Γ_f o coeficiente de reflexão nos terminais do conversor de frequências (fonte). Considerando Z_f e Z_c maiores do que zero, Γ_f será sempre maior do que -1 e menor do que 1 . Cabe ressaltar que, na maioria dos casos, diferentemente da impedância dos motores, a impedância do conversor é menor do que a impedância do cabo, implicando em um coeficiente de reflexão do conversor menor do que zero, o que resulta em uma reflexão da onda com polaridade invertida.

Logo após essa reflexão no conversor, a onda se propaga novamente em direção aos terminais do motor, reiniciando o ciclo de reflexões da onda através do cabo de transmissão (PAUL, 2006). Essa sequência de reflexões de onda gera um transitório de sobretensão nos terminais do motor. Esse transitório, se desprezados os efeitos indutivos e capacitivos da carga e do cabo, tem a forma de onda semelhante à apresentada na Figura 4.

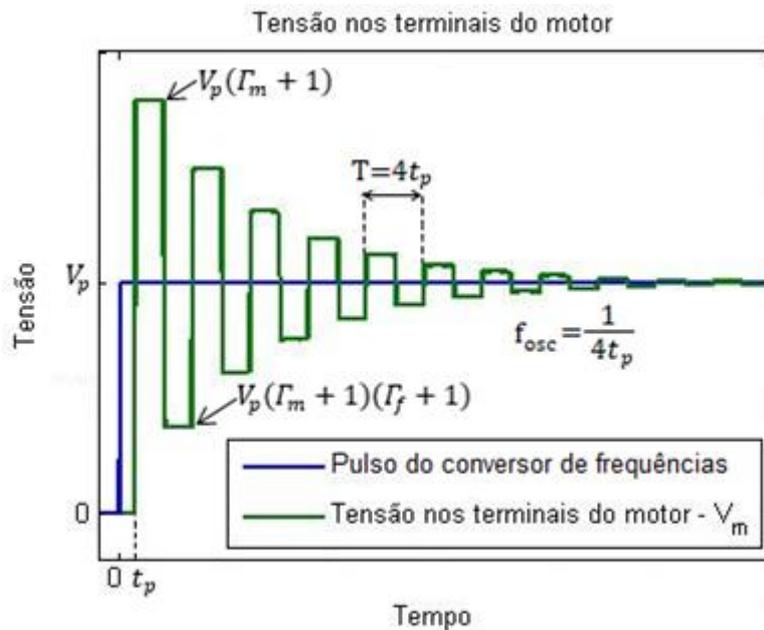


Figura 4 - Curva genérica da sobretensão nos terminais do motor acionado por conversor

A cada reflexão da onda, tanto nos terminais do motor como nos terminais do conversor de frequências, a onda que é refletida de volta para o cabo tem sua amplitude multiplicada por Γ_m ou Γ_f . Segundo as Equações (3) e (7), esses dois coeficientes de reflexão apresentam valores

maiores do que -1 e menores do que 1 . Dessa forma, essa onda refletida tem sua amplitude reduzida a cada reflexão, reduzido, também, a sobretensão a cada reflexão de onda nos terminais do motor, caracterizando, assim, esse transitório como um transitório subamortecido, que naturalmente se estabiliza na tensão de regime permanente dos terminais do motor. Uma exposição mais detalhada do transitório da sobretensão é apresentada na subseção 4.3.

O tempo que a onda leva para percorrer toda a extensão do cabo é o tempo de propagação, representado como t_p . O período para a oscilação completa da sobretensão é equivalente a quatro vezes esse tempo, que é o ciclo de completo entre duas reflexões de onda subsequentes nos terminais do motor. Dessa forma, o transitório de sobretensão oscila em uma frequência de $1/4t_p$ (KORHONEN et al., 2010).

Em geral, para cabos elétricos de uso industrial, a velocidade de propagação de pulsos elétricos é, aproximadamente, metade da velocidade da luz (SKIBINSKI et al., 1998). Sendo a velocidade de propagação dos pulsos muito alta e o comprimento dos cabos que interligam conversores de frequência aos motores de dezenas ou centenas de metros, em geral a frequência de oscilação desses transitórios de sobretensão é muito alta, de dezenas de quilohertz até megahertz (PERSSON, 1992; VON JOUANNE et al., 1996; NAUMANEN et al., 2010).

Cabe acrescentar que, em casos de pulsos com tempo de subida muito curtos as reflexões podem ocorrer até mesmo internamente aos enrolamentos do motor, entre espiras. A análise da distribuição da tensão nos enrolamentos do motor realizada por (NARANG et al., 1989; MELFI et al., 1998; MIRAFZAL et al., 2007) indicam que para pulsos com $t_s < 0,3 \mu s$ uma oscilação de tensão, transitória, entre 20 e 30 MHz aparece nas primeiras espiras dos enrolamentos, gerando uma diferença de tensão entre essas espiras quatro vezes maior do que o valor que ocorre em regime permanente. O que indica a ocorrência de reflexões dentro dos enrolamentos. Essa oscilação de tensão coloca em risco não só a isolação entre espiras, como também a isolação entre fases, uma vez que é comum que a parte inicial dos enrolamentos de uma fase seja posicionada geometricamente próxima à parte final do enrolamento de outras fases, podendo, nessa região, haver uma diferença de tensão muito grande, favorecendo a ocorrência de descargas parciais (MELFI et al., 1998).

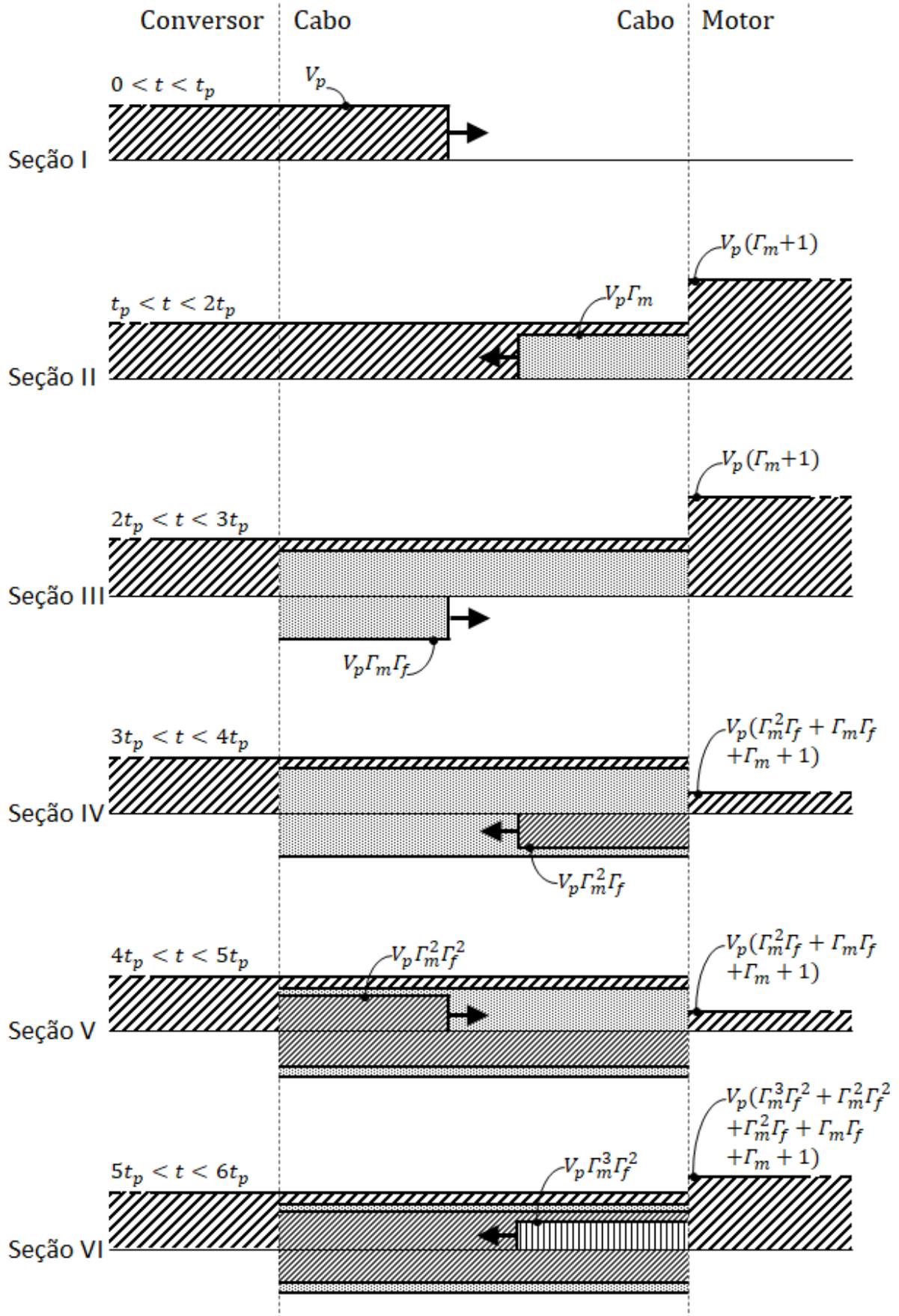


Figura 6 - Sequência de frentes de onda dos pulsos refletidos no cabo

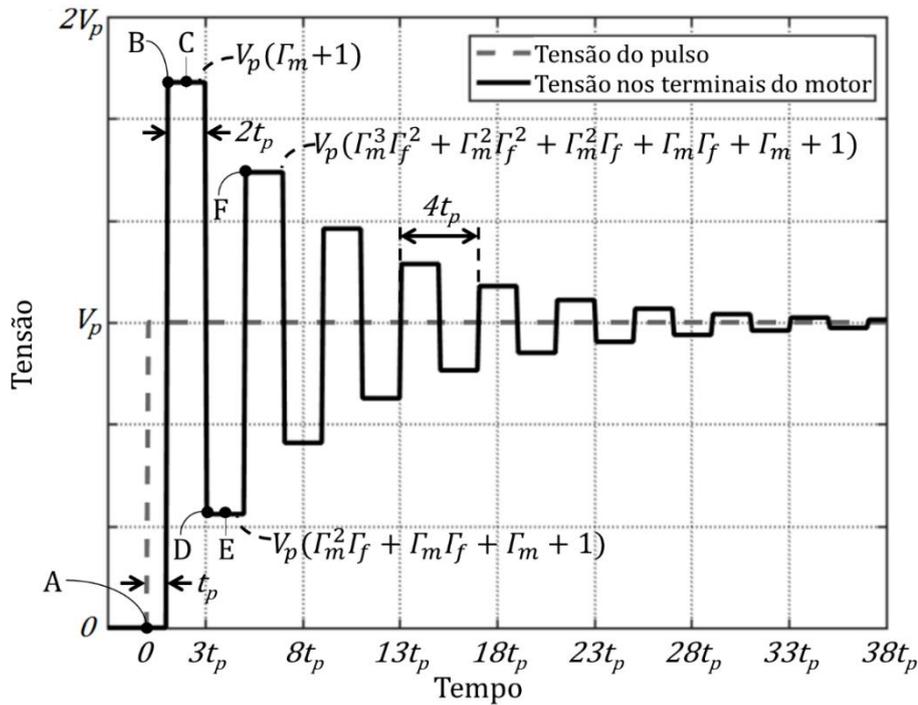


Figura 7 - Detalhamento da curva genérica da sobre-tensão nos terminais do motor

Primeira etapa, período $0 < t < t_p$, emissão do pulso do conversor de frequências para o motor elétrico através do cabo. Nesse período o pulso de amplitude V_p , que foi emitido no instante $t = 0$, é propagado do conversor ao motor, através do cabo. Esse pulso é propagado pelo cabo como uma onda de tensão e chegará ao motor no instante $t = t_p$. Nesse período a tensão no motor ainda é nula, $V_m = 0$. Essa etapa está representada entre os pontos A e B da Figura 5 e da Figura 7 e na seção I da Figura 6.

Segunda etapa, instante $t = t_p$, o pulso de amplitude V_p atinge os terminais do motor, nesse instante ocorre a primeira reflexão de pulso. O pulso refletido, de amplitude $\Gamma_m V_p$, é propagado de volta para o cabo, em direção ao conversor. Em razão dessa reflexão do pulso, a tensão nos terminais do motor é a somatória da amplitude do pulso incidente e do pulso refletido, resultando em $V_m = V_p + \Gamma_m V_p = V_p(\Gamma_m + 1)$. Um pulso dessa mesma amplitude, $V_p(\Gamma_m + 1)$, é transmitido para os enrolamentos internos do motor. Na maioria das configurações Γ_m tem valor positivo, sendo geralmente um pouco menor do que 1, dessa forma, o valor de tensão nos terminais do motor é próximo do dobro da amplitude do pulso incidente, $V_m \approx 2V_p$. Essa etapa está representada no ponto B da Figura 5 e da Figura 7.

Terceira etapa, período $t_p < t < 2t_p$, retorno do pulso refletido no motor até o conversor. O pulso refletido de amplitude $\Gamma_m V_p$ é propagado pelo cabo como uma onda de tensão e chega ao conversor no instante $t = 2t_p$. Nesse período a tensão no motor segue

inalterada, $V_m = V_p(\Gamma_m + 1)$. Essa etapa está representada entre os pontos B e C da Figura 5 e da Figura 7 e na seção II da Figura 6.

Quarta etapa, instante $t = 2t_p$, o pulso refletido no motor, de amplitude $\Gamma_m V_p$, atinge os terminais do conversor, neste instante ocorre a segunda reflexão do pulso. Um pulso de amplitude $\Gamma_f \Gamma_m V_p$ é refletido de volta para o cabo, em direção ao motor. Na maioria das configurações Γ_f tem valor negativo, geralmente muito próximo de -1 , dessa forma, o pulso refletido tem polaridade inversa àquela do pulso incidente. Nesse período a tensão no motor segue inalterada, $V_m = V_p(\Gamma_m + 1)$. Essa etapa está representada no ponto C da Figura 5 e da Figura 7.

Sexta etapa, período $2t_p < t < 3t_p$, retorno do pulso refletido no conversor até o motor. Esse pulso refletido de amplitude $\Gamma_f \Gamma_m V_p$ é propagado pelo cabo como uma onda de tensão e chega ao motor no instante $t = 3t_p$. Nesse período a tensão no motor segue inalterada, $V_m = V_p(\Gamma_m + 1)$. Essa etapa está representada entre os pontos C e D da Figura 5 e da Figura 7 e na seção III da Figura 6.

Sétima etapa, instante $t = 3t_p$, o pulso refletido no conversor, de amplitude $\Gamma_f \Gamma_m V_p$, atinge os terminais do motor, nesse instante ocorre a terceira reflexão de pulso. Um pulso de amplitude $\Gamma_f \Gamma_m^2 V_p$ é refletido de volta para o cabo, em direção ao conversor. Um pulso de amplitude $\Gamma_f \Gamma_m (\Gamma_m + 1) V_p$ é transmitido para os enrolamentos do motor. É importante destacar que esse pulso refletido e esse pulso transmitido seguem com a polaridade inversa à polaridade do pulso original emitido pelo conversor. Em razão dessa reflexão de pulso, a tensão nos terminais do motor passará a ser a somatória da amplitude do pulso incidente, da amplitude do pulso refletido e da amplitude da tensão anterior dos terminais do motor, resultando na tensão no motor $V_m = \Gamma_f \Gamma_m V_p + \Gamma_f \Gamma_m^2 V_p + V_p(\Gamma_m + 1)$, ou de forma mais simples, $V_m = V_p(\Gamma_f \Gamma_m^2 + \Gamma_f \Gamma_m + \Gamma_m + 1)$. Sendo Γ_m próximo de 1 e Γ_f próximo de -1 , esse novo valor da tensão nos terminais do motor é menor do que V_p . Essa etapa está representada no ponto D da Figura 5 e da Figura 7.

Oitava etapa, período $3t_p < t < 4t_p$, retorno do pulso refletido no motor até o conversor. Esse pulso refletido de amplitude $\Gamma_f \Gamma_m^2 V_p$ e polaridade inversa àquela do pulso original, é propagado pelo cabo como uma onda de tensão e chega ao conversor no instante $t = 4t_p$. Nesse período a tensão no motor segue inalterada,

$V_m = V_p(\Gamma_f \Gamma_m^2 + \Gamma_f \Gamma_m + \Gamma_m + 1)$. Essa etapa está representada entre os pontos D e E da Figura 5 e da Figura 7 e na seção IV da Figura 6.

Nona etapa, instante $t = 4t_p$, o pulso refletido no motor, de amplitude $\Gamma_f \Gamma_m^2 V_p$, atinge os terminais do conversor, neste instante ocorre a quarta reflexão de pulso. Um pulso de amplitude $\Gamma_f^2 \Gamma_m^2 V_p$ é refletido de volta para o cabo, em direção ao motor. Novamente, o pulso refletido no conversor tem a sua polaridade invertida, resultando em um pulso de mesma polaridade do pulso original emitido pelo conversor no instante $t = 0$. Nesse período a tensão no motor segue inalterada, $V_m = V_p(\Gamma_f \Gamma_m^2 + \Gamma_f \Gamma_m + \Gamma_m + 1)$. Essa etapa está representada no ponto E da Figura 5 e da Figura 7.

A partir dessa etapa o ciclo se repete: no instante $t = 5t_p$ esse pulso refletido, de mesma polaridade do pulso original, incidirá nos terminais do motor, elevando a tensão para um valor acima de V_p , porém menor do que o valor de tensão no período $t_p < t < 3t_p$. Um novo pulso será refletido para o conversor e nos seus terminais será novamente refletido no instante $t = 6t_p$, com nova inversão de polaridade. Em $t = 7t_p$ esse pulso refletido chega novamente ao motor, abaixando a tensão para um valor menor do que V_p , porém maior do que o valor de tensão no instante $3t_p < t < 5t_p$. Essas reflexões de pulso e inversão de polaridade vão se sucedendo, o pulso refletido tem o módulo da amplitude cada vez menor, até se anular, e o valor da tensão no motor vai a cada ciclo se aproximando do valor de regime permanente.

Na configuração apresentada, o transitório da sobretensão apresenta o comportamento de, a cada ciclo de reflexões de pulso, o valor da tensão no motor ir se aproximando do valor em regime permanente. Assim, pode-se fazer uma analogia como um sistema subamortecido.

Devido às características de oscilação da tensão nos terminais do motor, também, é possível destacar que o período de oscilação é $T_{osc} = 4t_p$, que é o tempo necessário para o ciclo completo das duas reflexões de pulso com a polaridade idêntica à do pulso original e das duas reflexões de pulso com a polaridade inversa à do pulso original. Consequentemente, a frequência de oscilação é $f_{osc} = 1/4t_p$.

Um processo semelhante acontece quando o conversor “corta” o pulso, e acontece a transição de nível alto para nível baixo do pulso (DE PAULA DOS SANTOS; SARTORI, 2018), conforme apresenta a Figura 8.

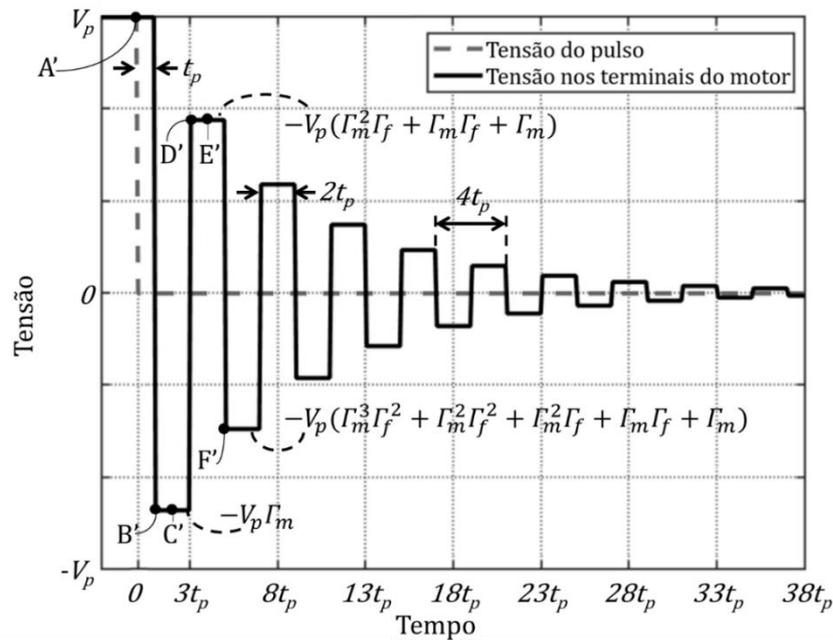


Figura 8 - Transitório da sobretensão no motor durante a descida do pulso do conversor

Situações de sobretensão ainda piores podem acontecer quando mais de uma transição do pulso ocorre sequencialmente, e uma dessas transições ocorre antes que o transitório da sobretensão causado pela transição anterior tenha se estabilizado. Uma situação como essa é exemplificada na Figura 9. Nesses casos, a sobretensão nos terminais do motor pode exceder o dobro da amplitude do pulso emitido pelo conversor de frequências.

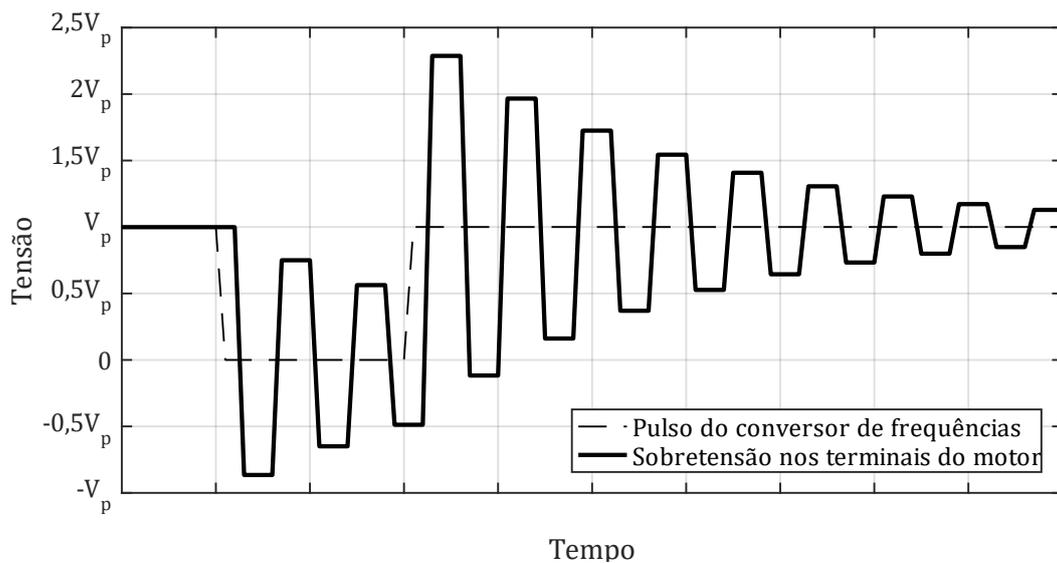


Figura 9 - Transitório da sobretensão no motor após duas transições rápidas do nível de tensão do pulso emitido pelo conversor

4.4. Modelagem Matemática da Sobretensão nos Terminais do Motor

A sobretensão é um transitório, na maioria dos casos de frequências elevadas, que acontece por conta de reflexões de pulso e ondas de tensão nas interfaces entre meios de impedância diferentes. Esse transitório pode ser modelado matematicamente, para um melhor entendimento das suas características e para a formulação de estratégias de redução dessa sobretensão.

A fim de apresentar uma modelagem, cujo entendimento seja mais claro, utilizaremos o caso concreto de um motor (carga) sendo acionado por um conversor de frequências (fonte), por meio de um cabo elétrico longo (meio de propagação da onda). No entanto, esse mesmo modelo matemático pode ser aplicado em outros casos análogos.

As subseções seguintes apresentarão a montagem de um modelo matemático para a representação do transitório de sobretensão.

4.4.1. Regime Permanente: Análise do Circuito Elétrico

Pensando, inicialmente, como análise de circuitos elétricos, uma simplificação de circuito representando o arranjo proposto (conversor de frequências – cabo elétrico – motor elétrico), seria o apresentado na Figura 10.

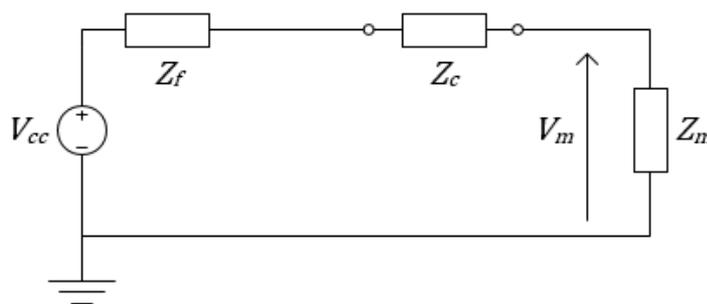


Figura 10 - Circuito simplificado do arranjo de um motor acionado por um conversor via cabo

Uma resolução simples do circuito, para tensão no motor em regime permanente, seria:

$$V_m = \frac{V_{cc}Z_m}{Z_f + Z_c + Z_m} \quad (8)$$

Porém, considerando o cabo como um meio de propagação sem perdas para o pulso de tensão emitido pelo conversor de frequências, o cenário exige uma análise diferente.

No primeiro momento, em que pulso é emitido pelo conversor e atinge o cabo, por se tratar de um meio de transmissão, ocorre uma divisão de tensão conforme descrito na Equação (6), $V_p = V_{cc}Z_c/(Z_f + Z_c)$, e V_p é a amplitude do pulso que se propaga no cabo.

Após o transitório de reflexões no cabo cessarem, quando as duas extremidades do cabo atingem o mesmo potencial de tensão elétrica, é que é atingido o regime permanente. Considerando o cabo sem perdas, e com o mesmo potencial em ambas as extremidades, não há queda de tensão no cabo, logo, a tensão no motor é dada pela divisão da tensão na impedância do conversor e na impedância do motor, conforme a equação a seguir:

$$V_{m_{RP}} = \frac{V_{cc}Z_m}{Z_f + Z_m} \quad (9)$$

4.4.2. Transitório: Análise de Superposição de Pulsos Refletidos no Domínio do Tempo

Até que a tensão no motor se estabilize e alcance o valor da tensão de regime permanente descrito na Equação (9), ocorre o transitório de sobretensão descrito em detalhes na seção 4.3.

Para modelar matematicamente esse transitório é importante levar em conta a sua característica interativa, de alteração do estado da tensão nos terminais do motor a cada reflexão de pulso e onda de tensão que ocorre nos terminais do motor.

Novamente será considerada a situação em que no instante $t = 0$ um pulso de tensão com amplitude V_{cc} é emitido pelo conversor de frequência, resultando na propagação de um pulso de amplitude V_p no cabo. Após um intervalo de tempo t_p esse pulso percorre todo o cabo e alcança os terminais do motor pela primeira vez. Nesse instante, ocorre a primeira reflexão de pulso, resultando em uma tensão nos terminais do motor acima da amplitude do pulso emitido pelo conversor (ZANETTA, 2003; PAUL, 2006; CARDOSO, 2011). As equações que descrevem as ondas e a tensão nos terminais do motor são apresentadas a seguir:

$$V_{incidente(t=t_p)} = V_p \quad (10)$$

$$V_{refletida(t=t_p)} = V_p \Gamma_m \quad (11)$$

$$V_{m(t=t_p)} = V_p (\Gamma_m + 1) \quad (12)$$

O pulso refletido nos terminais do motor será, novamente, refletido nos terminais do conversor, no instante $t = 2t_p$, com amplitude $V_p \Gamma_m \Gamma_f$. Em geral, Γ_f tem valor negativo, e esse pulso refletido no conversor sofre inversão de polaridade. Esse pulso incide nos terminais do motor no instante $t = 3t_p$. A tensão nos terminais do motor passa a ser a soma da amplitude da tensão do instante anterior à incidência desse segundo pulso, a amplitude da tensão do pulso incidente e a amplitude da tensão do pulso refletido. As equações são apresentadas a seguir:

$$V_{incidente(t=3t_p)} = V_p \Gamma_m \Gamma_f \quad (13)$$

$$V_{refletida(t=3t_p)} = V_p \Gamma_m^2 \Gamma_f \quad (14)$$

$$V_{m(t=3t_p)} = V_p (\Gamma_m^2 \Gamma_f + \Gamma_m \Gamma_f + \Gamma_m + 1) \quad (15)$$

Tanto o pulso incidente como o pulso refletido apresentam polaridade invertida em relação à ao pulso emitido pelo conversor, o que resulta em uma redução na amplitude da tensão nos terminais do motor.

Mais uma vez o pulso refletido nos terminais do motor voltar a ser refletido nos terminais do conversor, dessa vez no instante $t = 4t_p$, com amplitude $V_p \Gamma_m^2 \Gamma_f^2$. Passando por nova inversão de polaridade, o pulso volta a ter a mesma polaridade que o pulso emitido pelo conversor. Esse pulso irá novamente incidir nos terminais do motor, agora no instante $t = 5t_p$. Outra vez, a tensão resultante nos terminais do motor passa a ser a soma da amplitude da tensão do instante anterior à incidência desse terceiro pulso, a amplitude da tensão desse pulso incidente e a amplitude da tensão do pulso refletido. As equações são apresentadas a seguir:

$$V_{incidente(t=5t_p)} = V_p \Gamma_m^2 \Gamma_f^2 \quad (16)$$

$$V_{refletida(t=5t_p)} = V_p \Gamma_m^3 \Gamma_f^2 \quad (17)$$

$$V_{m(t=5t_p)} = V_p (\Gamma_m^3 \Gamma_f^2 + \Gamma_m^2 \Gamma_f^2 + \Gamma_m^2 \Gamma_f + \Gamma_m \Gamma_f + \Gamma_m + 1) \quad (18)$$

É possível perceber que, após a incidência do primeiro pulso nos terminais do motor, no instante $t = t_p$, a cada intervalo de tempo $2t_p$ um novo pulso incide nos terminais do motor alterando a amplitude da sua tensão. Além disso, em cada um desses eventos, a amplitude da tensão resultante é uma somatória da amplitude da tensão nos terminais do motor no instante anterior à incidência do pulso, da amplitude do pulso incidente e da amplitude do pulso refletido.

Adicionalmente, é possível formular a evolução da amplitude da tensão dos pulsos incidentes e refletidos, nesses intervalos de tempo de $2t_p$, em razão da amplitude do pulso original e dos coeficientes de reflexão na interface entre o cabo e o motor Γ_m e entre o cabo e o conversor Γ_f . A combinação dessas características permite a formulação do transitório de sobretensão.

A cada vez que um pulso é refletido, seja nos terminais do motor ou nos terminais do conversor, a amplitude da tensão do pulso é multiplicada pelo coeficiente de reflexão daquela interface. Tendo o pulso original amplitude V_p , sabendo que a sua primeira reflexão acontece nos terminais do motor no instante $t = t_p$ e se repete a cada intervalo de tempo de $2t_p$, portanto nos instantes $t = t_p, 3t_p, 5t_p, 7t_p \dots$. Sabendo-se, também, que o pulso refletido nos terminais do motor é refletido nos terminais do conversor de frequências em um instante t_p posterior, ou seja, nos instantes $t = 2t_p, 4t_p, 6t_p, 8t_p \dots$, é possível formular a evolução dos pulsos incidentes e refletidos nos terminais do motor a cada intervalo de tempo de $2t_p$ da seguinte forma:

$$V_{incidente_n} = V_p \Gamma_m^{n-1} \Gamma_f^{n-1} \quad (19)$$

$$V_{refletido_n} = V_p \Gamma_m^n \Gamma_f^{n-1} \quad (20)$$

Sendo n um número inteiro, positivo, maior do que zero e representado por $n = (t + t_p)/2$, havendo, portanto, transição de estado na fórmula dos pulsos incidentes e refletidos no terminal do motor, a cada intervalo de tempo de $2t_p$ a partir do instante $t = t_p$.

A Tabela 1 exemplifica o cálculo da tensão de alguns pulsos incidentes e refletidos através das Equações (19) e (20).

Formuladas as tensões dos pulsos incidentes e dos pulsos refletidos nos terminais do motor, resta estabelecer a somatória dessas duas componentes com os estágios de tensão nos

terminais do motor nos instantes imediatamente anteriores à incidência do pulso, para a formulação da amplitude da sobretensão nos terminais do motor. A referida formulação, proposta em (DE PAULA DOS SANTOS; SARTORI, 2018), é apresentada na equação a seguir:

Tabela 1 - Exemplo do cálculo da tensão dos pulsos incidentes e refletidos nos terminais do motor

Instante	Número da incidência	Tensão do pulso incidente	Tensão do pulso refletido
$t = t_p$	$n = 1$	$V_{incidente_1} = V_p$	$V_{refletido_1} = V_p \Gamma_m$
$t = 3t_p$	$n = 2$	$V_{incidente_2} = V_p \Gamma_m \Gamma_f$	$V_{refletido_2} = V_p \Gamma_m^2 \Gamma_f$
$t = 5t_p$	$n = 3$	$V_{incidente_3} = V_p \Gamma_m^2 \Gamma_f^2$	$V_{refletido_3} = V_p \Gamma_m^3 \Gamma_f^2$
$t = 7t_p$	$n = 4$	$V_{incidente_4} = V_p \Gamma_m^3 \Gamma_f^3$	$V_{refletido_3} = V_p \Gamma_m^4 \Gamma_f^3$

$$V_{m_n} = \sum_{k=1}^n V_p (\Gamma_m^k \Gamma_f^{k-1} + \Gamma_m^{k-1} \Gamma_f^{k-1}) = V_p (\Gamma_m + 1) \sum_{k=1}^n (\Gamma_m \Gamma_f)^{k-1} \quad (21)$$

Sendo k um número inteiro, positivo e maior do que zero.

A Tabela 2 exemplifica o cálculo da amplitude da tensão nos terminais do motor para os primeiros pulso incidentes e refletidos, utilizando as Equações (19), (20) e (21).

Tabela 2 - Exemplo do cálculo da tensão nos terminais do motor

Instante	Número da incidência	Tensão do pulso incidente	Tensão do pulso refletido	Tensão nos terminais do motor
$t = t_p$	$n = 1$	V_p	$V_p \Gamma_m$	$V_{m_1} = V_p (\Gamma_m + 1)$
$t = 3t_p$	$n = 2$	$V_p \Gamma_m \Gamma_f$	$V_p \Gamma_m^2 \Gamma_f$	$V_{m_2} = V_p (\Gamma_m^2 \Gamma_f + \Gamma_m \Gamma_f + \Gamma_m + 1)$
$t = 5t_p$	$n = 3$	$V_p \Gamma_m^2 \Gamma_f^2$	$V_p \Gamma_m^3 \Gamma_f^2$	$V_{m_3} = V_p (\Gamma_m^3 \Gamma_f^2 + \Gamma_m^2 \Gamma_f^2 + \Gamma_m^2 \Gamma_f + \Gamma_m \Gamma_f + \Gamma_m + 1)$
$t = 7t_p$	$n = 4$	$V_p \Gamma_m^3 \Gamma_f^3$	$V_p \Gamma_m^4 \Gamma_f^3$	$V_{m_4} = V_p (\Gamma_m^4 \Gamma_f^3 + \Gamma_m^3 \Gamma_f^3 + \Gamma_m^3 \Gamma_f^2 + \Gamma_m^2 \Gamma_f^2 + \Gamma_m^2 \Gamma_f + \Gamma_m \Gamma_f + \Gamma_m + 1)$

Cabe lembrar que nos casos de motores acionados por conversores, o coeficiente de reflexão nos terminais do motor Γ_m apresenta valor positivo próximo de 1, porém menor do que

1. Já o coeficiente de reflexão nos terminais do conversor Γ_f apresenta valor negativo maior do que -1 . Dessa forma, é interessante notar que o módulo dos termos $\Gamma_m^k \Gamma_f^{k-1}$ e $\Gamma_m^{k-1} \Gamma_f^{k-1}$ diminui à medida que k aumenta. Além disso, para k par, ambos os termos apresentam valor negativo e para k ímpar, ambos os termos apresentam valor positivo. Portanto, a expressão que é variável dentro da somatória da Equação (21), $\Gamma_m^k \Gamma_f^{k-1} + \Gamma_m^{k-1} \Gamma_f^{k-1}$, a cada nova reflexão da onda e aumento do índice k , tem o seu módulo reduzido e o seu sinal invertido, resultando no comportamento de oscilação que vai sendo amortecida até encontrar o patamar de tensão de regime permanente do sistema.

Uma solução para a série apresentada na Equação (11) que denota esse comportamento de oscilação amortecida é apresentada a seguir.

$$V_{m_n} = V_p (\Gamma_m + 1) \sum_{k=1}^n (\Gamma_m \Gamma_f)^{k-1} = V_p (\Gamma_m + 1) \frac{(\Gamma_m \Gamma_f)^n - 1}{\Gamma_m \Gamma_f - 1} \quad (22)$$

O termo constante, $V_p (\Gamma_m + 1) / (\Gamma_m \Gamma_f - 1)$, apresenta valor sempre negativo. O termo variável, $(\Gamma_m \Gamma_f)^n - 1$, também apresenta valor sempre negativo, uma vez que o módulo de $(\Gamma_m \Gamma_f)^n$ é sempre menor do que 1. A tensão V_{m_n} , que é o produto desses dois valores é, portanto, sempre positiva. Apesar disso, o valor da tensão oscila em razão do termo $(\Gamma_m \Gamma_f)^n$ que é negativo para n ímpar e positivo para n par.

Importante ressaltar que a formulação apresentada é condizente com a realidade para as condições de $n = 0$ e $n \rightarrow \infty$. O valor nulo de n indica que ainda não houve nenhuma incidência do pulso no motor, portanto a sua tensão ainda é nula. Utilizando a Equação (22), com $n = 0$, o termo do numerador $(\Gamma_m \Gamma_f)^n - 1$ é nulo, e o denominador $\Gamma_m \Gamma_f - 1$ é não nulo, logo a tensão do motor é nula, $V_{m_0} = 0$. Na situação em que n é um valor muito grande, já ocorreram tantas reflexões do pulso no motor que o sistema se encontra em regime permanente. A Equação (9) apresenta a tensão no motor em regime permanente, $V_{m_{RP}} = V_{cc} Z_m / (Z_f + Z_m)$. Utilizando a Equação (22), com $n \rightarrow \infty$, temos:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} V_{m_n} = \frac{V_p (\Gamma_m + 1)}{\Gamma_m \Gamma_f - 1} \left[\lim_{n \rightarrow \infty} (\Gamma_m \Gamma_f)^n - 1 \right] = -\frac{V_p (\Gamma_m + 1)}{\Gamma_m \Gamma_f - 1} \quad (23)$$

Como Γ_m e Γ_f são sempre valores maiores que -1 e menores que 1 , o produto desses coeficientes, também, estará sempre dentro desse intervalo. Logo, $(\Gamma_m \Gamma_f)^n$ tende a zero, quando n tende ao infinito.

Reescrevendo a Equação (23) em termos das impedâncias do sistema e da tensão de corrente contínua do conversor de frequências, temos:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} V_{m_n} = -\frac{V_p(\Gamma_m + 1)}{\Gamma_m \Gamma_f - 1} = \frac{V_p(Z_f + Z_c)Z_m}{Z_c(Z_m + Z_f)} = \frac{V_{cc}Z_m}{Z_f + Z_m} = V_{m_{RP}} \quad (24)$$

Para fins de representação da curva da sobretensão descrita pela Equação (22), a Figura 11 apresenta essa curva a partir dos parâmetros descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros para elaboração de simulações e gráficos ilustrativos

Parâmetro	Símbolo	Valor
Tempo de propagação do pulso através do cabo	t_p	200 ns
Instante de disparo do pulso	t_0	100 ns
Tempo de subida do pulso	t_s	100 ns
Amplitude da tensão contínua interna do conversor	V_{cc}	100 V
Amplitude da tensão do pulso no cabo	V_p	90,91 V
Módulo da impedância interna do conversor	Z_f	10 Ω
Módulo da impedância do cabo	Z_c	100 Ω
Módulo da impedância do motor	Z_m	10 k Ω
Coefficiente de reflexão de onda nos terminais do motor	Γ_m	0,9802
Coefficiente de reflexão de onda nos terminais do conversor	Γ_f	-0,8182

É importante ressaltar que esses parâmetros representam um sistema simples, em que as impedâncias do conversor, do cabo e do motor são puramente resistivas. Além disso, os valores desses parâmetros foram definidos pelo autor unicamente com o propósito de representar de forma simples e didática a curva da sobretensão descrita pela Equação (22).

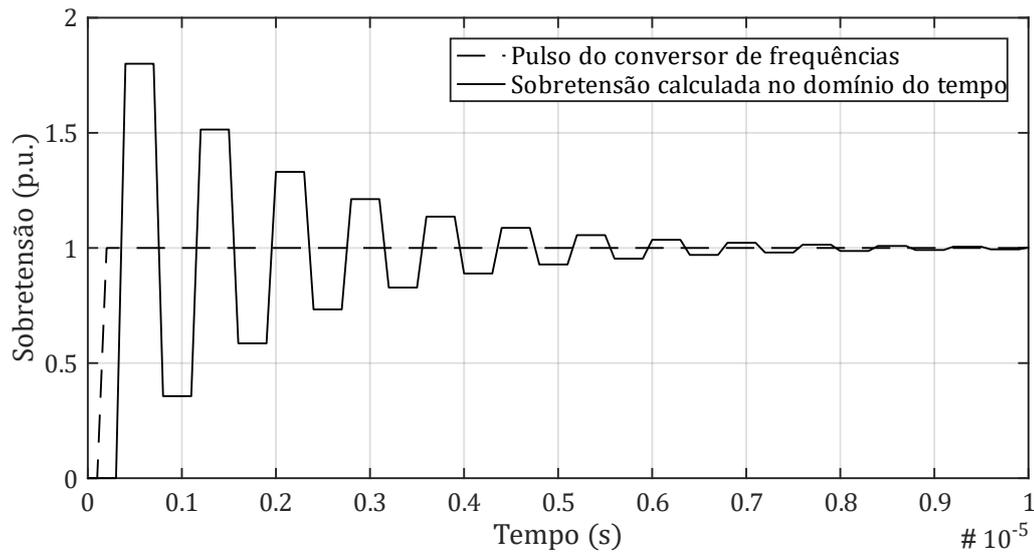


Figura 11 - Curva gerada através da equação da sobretensão no domínio do tempo

4.4.3. Transitório: Análise de Superposição de Pulsos Refletidos no Domínio das Frequências

Outra abordagem possível para a modelagem matemática do transitório da sobretensão é o uso do domínio das frequências para o representar os atrasos dos sinais que trafegam pelo cabo.

Essa abordagem é proposta em (LEE; NAM, 2002), e utilizada em (AMARIR; AL-HADDAD, 2006b), e faz uso da propriedade de deslocamento no tempo da transformada de Laplace, representada pelas equações a seguir:

$$\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s) \quad (25)$$

$$u(t - a) = \begin{cases} 0, & t \leq a \\ 1, & t > a \end{cases} \quad (26)$$

$$\mathcal{L}\{f(t - a)u(t - a)\} = e^{-as}F(s) \quad (27)$$

Fazendo uso dessa propriedade, os atrasos gerados pelo tempo de propagação dos pulsos pelo cabo elétrico poderão ser representados por $e^{-t_p s}$. Além disso, é possível descrever a posição x do pulso no interior do cabo elétrico, de comprimento l , considerando $x = 0$ nos terminais do conversor e $x = l$ nos terminais do motor, utilizando a expressão $e^{-(x/l)t_p s}$ quando

o pulso se propaga do conversor para o motor e $e^{(x/l)t_p s} e^{-t_p s}$ quando o pulso retorna do motor em direção ao conversor.

Dessa forma, representando a transformada de Laplace do pulso V_p como $V_p(s)$, o diagrama de treliças das reflexões do pulso no cabo, no domínio das frequências pode ser representado conforme a Figura 12.

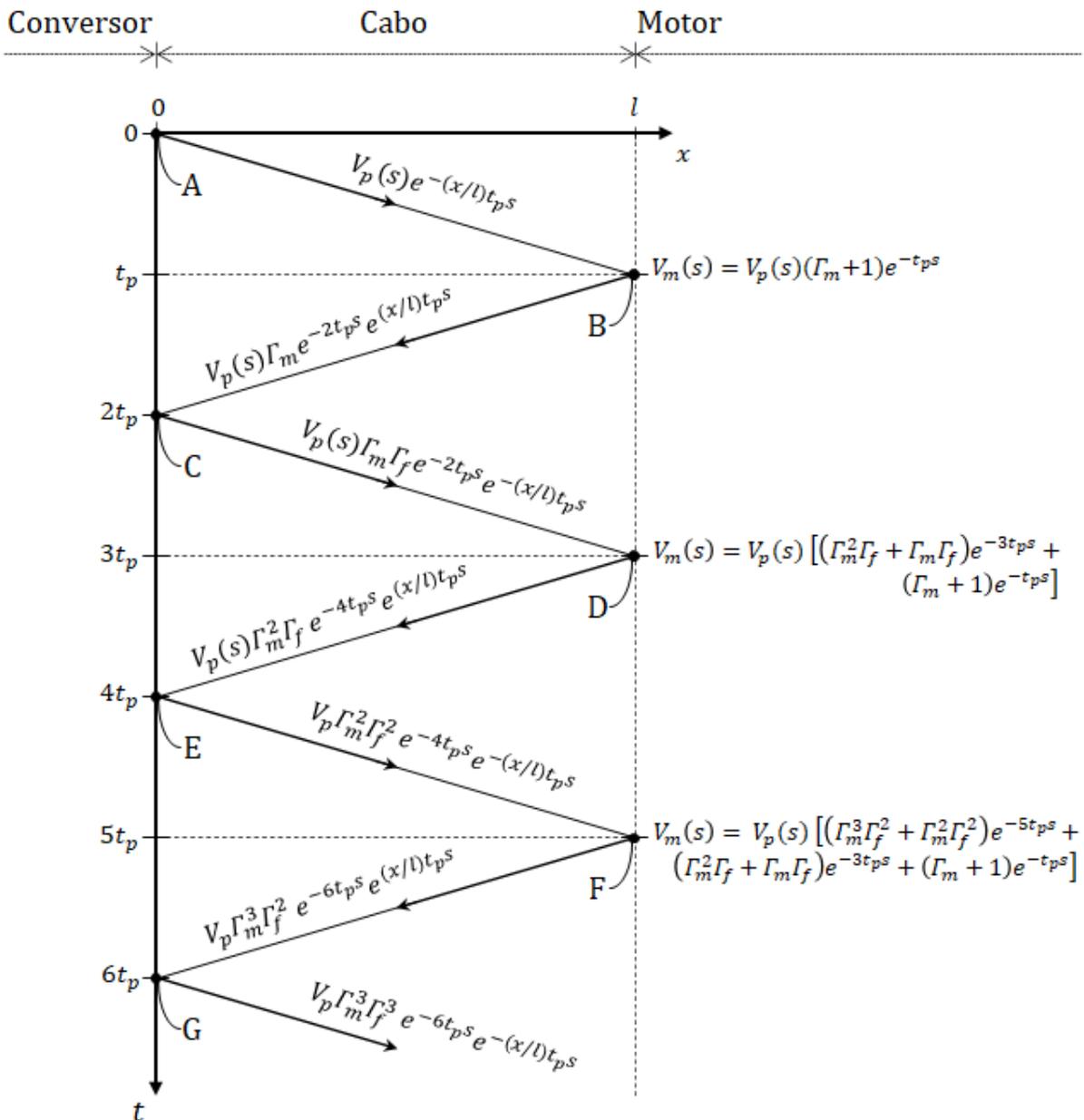


Figura 12 - Diagrama de treliças das reflexões de pulso de tensão no domínio das frequências
 Fonte: Adaptado de (LEE; NAM, 2002)

Pela lógica de incremento do valor da amplitude da tensão nos terminais do motor, devido ao processo iterativo de reflexões de pulsos no cabo, é possível elaborar o diagrama de blocos apresentado na Figura 13 para descrever o processo.

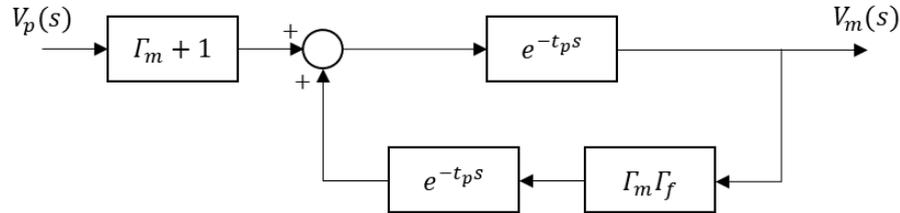


Figura 13 - Diagrama de blocos que descreve o transitório da sobretensão

É possível ressaltar no diagrama de blocos que, na ramificação de entrada o bloco de função $\Gamma_m + 1$ representa o aumento de amplitude do pulso de entrada $V_p(s)$, no momento da sua primeira reflexão nos terminais do motor. Os blocos de função $e^{-t_p s}$ representam o tempo de propagação dos pulsos no cabo, de valor t_p , tanto na direção do conversor para o motor (ramificação de ida), como na direção do motor para o conversor (ramificação de retorno). A ramificação de retorno apresenta o bloco de função $\Gamma_m \Gamma_f$ que representa a iteração de cada reflexão sequencial do pulso nos terminais do motor e nos terminais do conversor. A cada vez que o pulso sofre essas duas reflexões, ele tem a sua amplitude reduzida por esse fator $\Gamma_m \Gamma_f$.

Do diagrama de blocos da Figura 13 também é possível obter a função de transferência apresentada na Equação (28) a seguir:

$$H(s) = \frac{V_m(s)}{V_p(s)} = \left[\frac{(\Gamma_m + 1)e^{-t_p s}}{1 - \Gamma_m \Gamma_f e^{-2t_p s}} \right] \quad (28)$$

$$V_m(s) = V_p(s) \left[\frac{(\Gamma_m + 1)e^{-t_p s}}{1 - \Gamma_m \Gamma_f e^{-2t_p s}} \right] \quad (29)$$

Seguindo a lógica da representação dos modelos matemáticos de sistemas utilizando funções de entrada, de transferência e de resposta; como a equação $Y(s) = H(s)X(s)$, seria a função de entrada $X(s) = V_p(s)$, a função de resposta $Y(s) = V_m(s)$, e a função de transferência seria representada por $H(s) = (\Gamma_m + 1)e^{-t_p s} / (1 - \Gamma_m \Gamma_f e^{-2t_p s})$.

A representação gráfica da curva de sobretensão descrita pela Equação (29), obtida por simulação do diagrama da Figura 13 no software Simulink[®], é apresentada na Figura 14. Os valores dos parâmetros utilizados estão contidos na Tabela 3, presente na subseção 4.4.2.

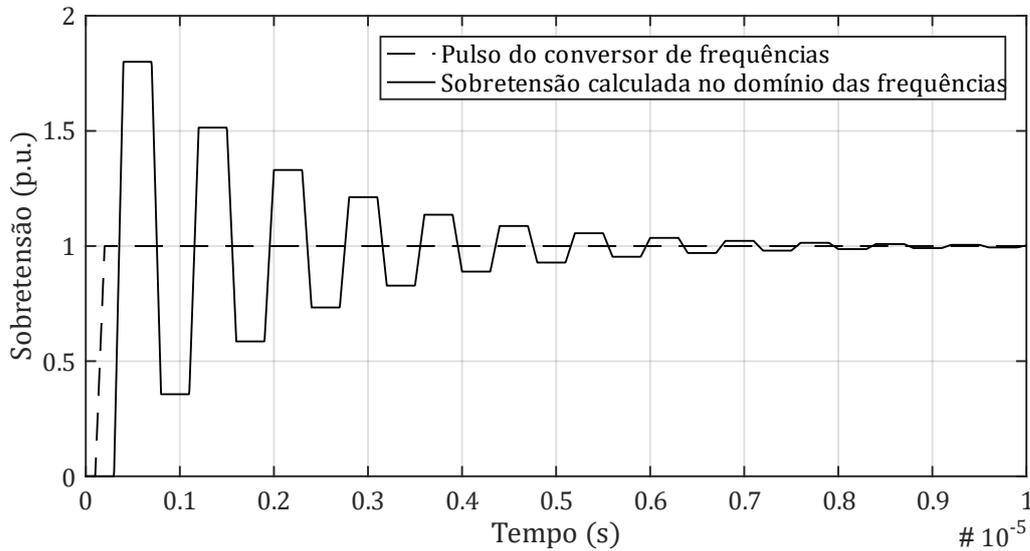


Figura 14 - Curva gerada através da equação da sobretensão no domínio das frequências

A Figura 15 apresenta a comparação entre as curvas apresentadas na Figura 11 e na Figura 14, respectivamente descritas pelas Equações (22) e (29).

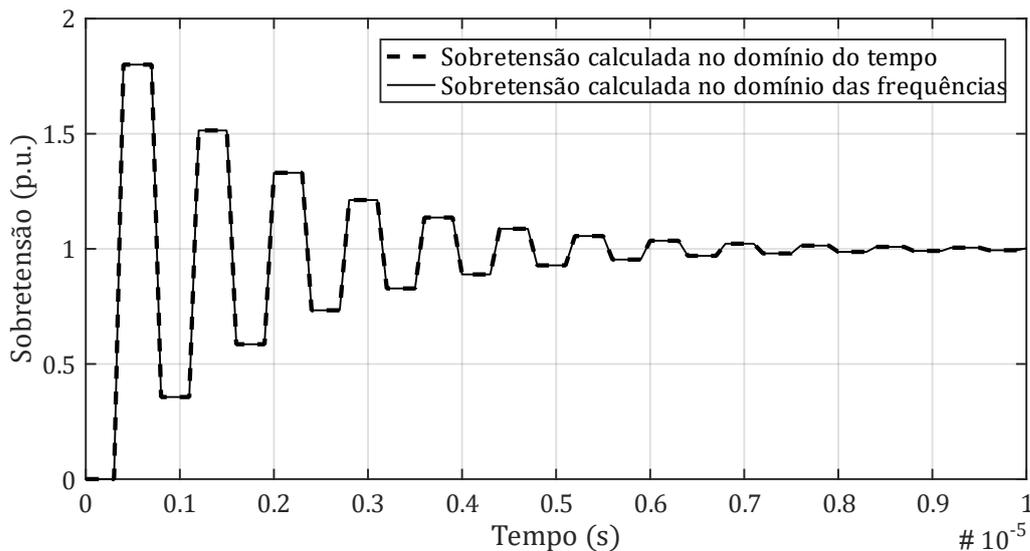


Figura 15 - Comparação das curvas das equações no domínio do tempo e das frequências

4.5. Métodos de Redução da Sobretensão

Em razão dos danos causados pela sobretensão em motores e demais cargas elétricas, seja pela amplitude da tensão ou pela oscilação em frequência elevada, foram desenvolvidos métodos, técnicas e dispositivos para reduzir os efeitos danosos da sobretensão. As subseções a seguir irão apresentar o método mais usual, a adoção de filtros passivos, além das técnicas relacionadas à superposição de pulsos, que são o foco principal deste estudo.

4.5.1. Filtros Passivos

Os métodos mais usuais de redução da sobretensão são baseados na aplicação de filtros passivos no sistema. Esses filtros, no geral, têm o propósito de reduzir o tempo de subida dos pulsos, atenuar componentes de frequências elevadas dos pulsos ou realizar casamento de impedâncias (LEE; NAM, 2002; KORHONEN et al., 2010; NAUMANEN et al., 2010). Um único filtro pode cumprir mais de uma dessas funções citadas.

Atendo-se aos casos de acionamento de motores por meio de conversores de frequência, conectados por cabos elétricos longos, os filtros são em geral alocados nos terminais de saída dos conversores de frequências ou nos terminais de entrada do motor, em ambos os casos, em uma das extremidades do cabo elétrico.

Usualmente, os filtros passivos são aplicados nos terminais de saída dos conversores de frequências, quando há o intuito de reduzir o tempo de subida dos pulsos ou atenuar seus componentes de alta frequência. Já a aplicação dos filtros nos terminais do motor tem o intuito de realizar um casamento de impedância do cabo com o conjunto filtro-motor (MOREIRA et al., 2001).

Dentre as técnicas mais usuais, é possível destacar: filtros RC, RL, RLC ou filtros senoidais nos terminais do conversor de frequências, e filtros RC, RLC e terminadores de cabo nos terminais do motor. Além disso, algumas configurações podem adotar diodos de corte, conectando os filtros ao barramento de tensão contínua dos conversores (HANIGOVSKI; POULSEN; BLAABJERG, 2004).

Inúmeras técnicas de dimensionamento de filtros com o propósito de redução de sobretensão estão disponíveis na literatura, vale ressaltar os trabalhos apresentados em

(AKAGI; MATSUMURA, 2011; AOKI; SATOH; NABAE, 1999; HANIGOVSKI; POULSEN; BLAABJERG, 2004; MELHORN; TANG, 1997; MOREIRA et al., 2001, 2002, 2005; VON JOUANNE et al., 1996; VON JOUANNE; ENJETI, 1997).

Como a literatura é vasta, iremos nos ater a dois métodos simples, com procedimento claro de dimensionamento dos componentes do filtro, são eles: filtro RLC nos terminais do conversor de frequências e filtro RC nos terminais do motor, ambos propostos por (VON JOUANNE et al., 1996; VON JOUANNE; ENJETI, 1997). A Figura 16 apresenta os circuitos dos dois filtros.

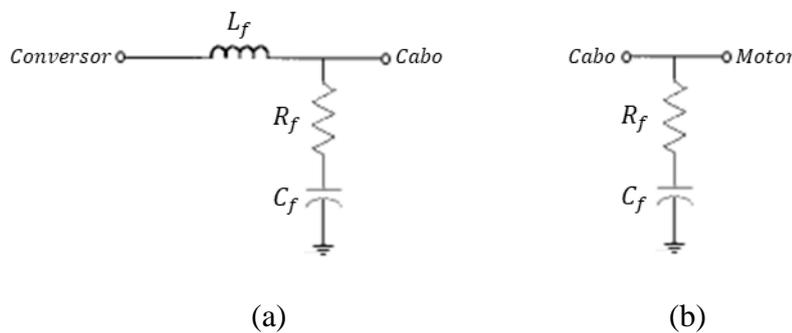


Figura 16 - Filtros passivos para redução da sobretensão

(a) filtro RLC nos terminais do conversor e (b) filtro RC nos terminais do motor

Fonte: Adaptado de (VON JOUANNE et al., 1996; VON JOUANNE; ENJETI, 1997)

Para o dimensionamento dos filtros, em ambos os casos, R_f deve ter valor equivalente à impedância característica do cabo Z_c , uma vez que para altas frequências C_f tem impedância próxima de um curto-circuito, e por isso R_f deve ser capaz de amortecer toda a energia proveniente do pulso. A impedância característica do cabo é dada por:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_c}{C_c}} \quad (30)$$

Sendo L_c a indutância do cabo por unidade de comprimento e C_c a capacitância do cabo por unidade de comprimento.

Para o filtro RLC na saída do conversor, (VON JOUANNE; ENJETI, 1997) propõem que a resposta seja superamortecida, com o intuito de reduzir o tempo de subida do pulso e com isso, e conseqüentemente, reduzir o pico da sobretensão. Para essa condição, a relação entre resistência, capacitância e indutância do filtro deve obedecer a seguinte inequação:

$$R_f \geq 2 \sqrt{\frac{L_f}{C_{f_RLC}}} \quad (31)$$

O próximo passo proposto é estabelecer um limite máximo de sobretensão e utilizar a equação da função de transferência do filtro:

$$H = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1 + j\omega R_f C_{f_RLC}}{1 - \omega^2 L_f C_{f_RLC} + j\omega R_f C_{f_RLC}} \quad (32)$$

Sendo, V_i a tensão de entrada, V_o a tensão de saída e a expressão (V_o/V_i) o valor por unidade (p. u.) da sobretensão.

Estabelecendo um valor máximo para sobretensão, de posse de R_f e utilizado a Inequação (31) e da Equação (32) é possível definir os parâmetros C_{f_RLC} e L_f do filtro RLC.

Para o cálculo de C_{f_RC} do filtro RC na entrada do motor, (VON JOUANNE; ENJETI, 1997) apresentam a seguinte equação da sobretensão no momento da segunda reflexão do pulso no motor:

$$V_{m(t=3t_p)} = V_{cc} (2 - e^{-[3t_p/(2Z_c C_{f_RC})]}) \quad (33)$$

O tempo de propagação do pulso no cabo, t_p , pode ser representado por:

$$t_p = l_c \sqrt{L_c C_c} \quad (34)$$

Deve-se definir um valor limite da sobretensão V_m e resolver a Equação (33), para a obtenção do valor mínimo de C_{f_RC} . A seguir, como exemplificação, a Equação (33) é resolvida para se obter o C_{f_RC} mínimo para a sobretensão de 20% ($V_m = 1,2V_{cc}$ ou $V_m = 1,2$ p. u.).

$$C_{f_RC} \geq -\frac{3l_c \sqrt{L_c C_c}}{2Z_c \ln 0,8} \quad (35)$$

Apenas para fins de ilustração, a Figura 17 apresenta as curvas de sobretensão dos filtros RLC no conversor e RC no motor utilizando os parâmetros extraídos de (VON JOUANNE;

ENJETI, 1997), que são: $L_c = 0,36 \mu H/pé$ ($1,18 \mu H/m$), $C_c = 1,08 pF/pé$ ($32,81 pF/m$), $l_c = 100 pés$ ($30,48 m$), $Z_c = 190 \Omega$, $R_f = 190 \Omega$, $L_f = 0,2 mH$, $C_{f_RLC} = 22,23 nF$ e $C_{f_RC} = 6,72 nF$.

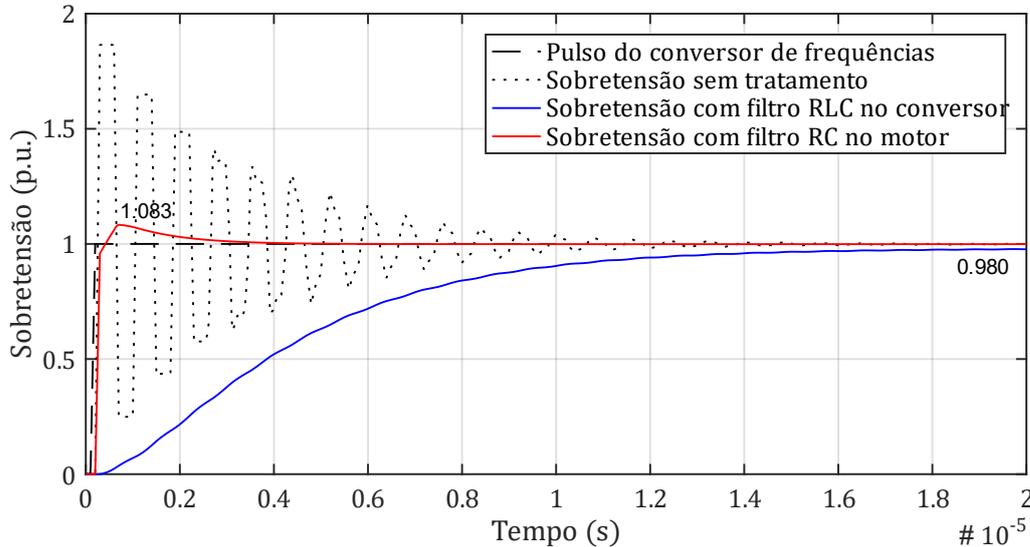


Figura 17 - Sobretensão com filtro RLC nos terminais do conversor e com filtro RC nos terminais do motor

Nas condições propostas os filtros são efetivos e atenuam muito a sobretensão. O filtro RLC retarda o tempo de subida do pulso e suprime a sobretensão. É uma resposta superamortecida e, por isso, mais lenta que as demais, demora aproximadamente $30 \mu s$ para alcançar o valor máximo da tensão no motor que é $0,981 p.u.$. O filtro RC no motor atua de forma rápida e precisa, não atrasa o tempo de subida do pulso, atua na já na primeira reflexão no motor, mantendo o valor de pico da sobretensão no motor em $1,083 p.u.$.

4.5.2. Superposição de Pulsos

Em geral os métodos de redução de sobretensão utilizando filtros passivos atuam na minimização dos efeitos da sobretensão, ou, quando atuam nas causas que originam a sobretensão, implicam na alteração das características do pulso, como por exemplo, a redução do tempo de subida do pulso e a supressão de componentes de frequências elevadas; ou alteração na configuração do sistema, como adição de componentes para realização de casamento de impedâncias (MOREIRA et al., 2001; HANIGOVSKI; POULSEN; BLAABJERG, 2004).

Existem métodos de redução da sobretensão que não alteram as características do pulso ou do sistema e atuam na natureza do fenômeno transitório da sobretensão, que é a reflexão de pulsos. Em geral, o objetivo é definir estratégias de emissão de pulsos que possam reduzir a amplitude dos pulsos refletidos no motor ou criar sobreposições e interferências destrutivas nesses pulsos, minimizando suas amplitudes e a sobretensão. Trata-se de métodos flexíveis, que por atuar no conversor, dispensam o uso de filtros passivos, que podem ser onerosos, volumosos, pouco flexíveis e acrescentam perdas ao conjunto de acionamento do motor (DE PAULA DOS SANTOS; SARTORI, 2020).

Dentre esses métodos, o que exemplifica de forma mais simples a característica principal da superposição de pulsos refletidos é aquele proposto por (LEE; NAM, 2002) e será apresentado na subseção 4.5.2.2. Os demais métodos de redução de sobretensão que, também, utilizam a estratégia de superposição e pulsos refletidos, serão apresentados nas subseções posteriores. A subseção seguinte apresenta o método precursor a todos estes, que utiliza os resistores de pré-inserção em linhas de transmissão.

4.5.2.1. Método Precursor – Resistores de Pré-Inserção

Nas manobras de energização de linhas de transmissão de energia elétrica, também, ocorrem sobretensões de alta amplitude e, assim como no acionamento de motores elétricos, diversas estratégias foram desenvolvidas para reduzi-las.

Uma dessas estratégias consiste na utilização de um resistor de pré-inserção, na entrada dessas linhas de transmissão, com o intuito de ser um divisor de tensão temporário da linha, atuando somente nos primeiros ciclos de carregamento da linha. Assim a linha é carregada em dois estágios, um com tensão na linha abaixo da tensão nominal, quando o resistor de pré-inserção está no circuito, e outro estágio com a tensão nominal, quando o resistor de pré-inserção passa a estar curto-circuitado (D'AJUZ, 1987). A Figura 18 apresenta um esquemático desse arranjo de acionamento e a Figura 19 mostra uma representação física do funcionamento do contato móvel do resistor de pré-inserção.

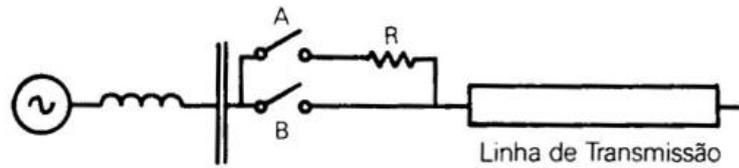


Figura 18 - Resistor de pré-inserção, arranjo esquemático

Fonte: Adaptado de (D'AJUZ, 1987)

O primeiro estágio ocorre quando somente a chave *A*, apresentada no esquemático da Figura 18, está fechada. Nessa situação a tensão é dividida entre o resistor de pré-inserção *R* e a linha de transmissão. A linha, portanto, é carregada com uma tensão abaixo da tensão nominal, conseqüentemente, a sobretensão nesse estágio também tem amplitude menor do que seria em tensão nominal. No segundo estágio a chave *B* é fechada, o resistor de pré-inserção *R* é curto-circuitado e a linha de transmissão é energizada com tensão nominal.

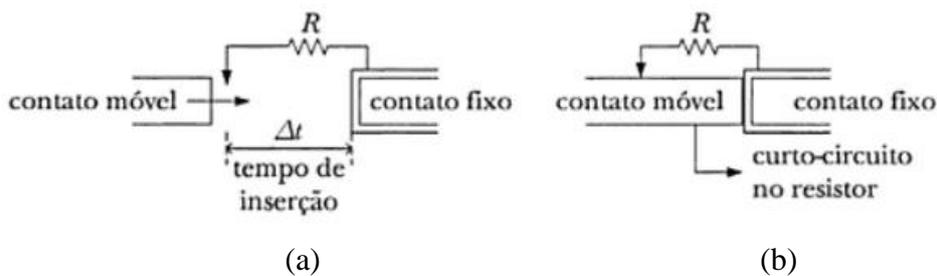


Figura 19 - Resistor de pré-inserção, arranjo físico

(a) antes do fechamento do contato móvel e (b) após o fechamento do contato móvel

Fonte: Adaptado de (ZANETTA, 2003)

Fisicamente o resistor de pré-inserção fica na câmara do disjuntor e o seu contato móvel atua conforme representação da Figura 19. À medida que o contato móvel caminha de encontro ao contato fixo, ele entra em contato, primeiro, com um dos terminais do resistor, iniciando o primeiro estágio de carregamento da linha, com tensão abaixo da tensão nominal, que dura o período do tempo de inserção Δt , até que o contato móvel encontre o contato fixo e coloque o resistor em curto-circuito, dando início ao segundo estágio de carregamento da linha, com tensão nominal.

Na prática, o início do segundo estágio de carregamento da linha desencadeia uma nova onda de tensão emitida à linha de transmissão, mas não de amplitude nominal da tensão do barramento do gerador e, sim, de amplitude igual à diferença entre essa tensão nominal e a atual tensão na extremidade inicial da linha de transmissão. Assim, a melhor estratégia é iniciar o segundo estágio somente após a primeira onda de tensão tiver sido refletida na extremidade

final da linha, tiver retornado e refletido novamente na extremidade inicial da linha, pois assim a tensão nessa extremidade inicial estará em uma amplitude mais alta e a nova onda emitida, no início do segundo estágio, será de amplitude pequena. O tempo para que ocorra essas duas reflexões sequenciadas da primeira onda é duas vezes o tempo de propagação da onda na linha.

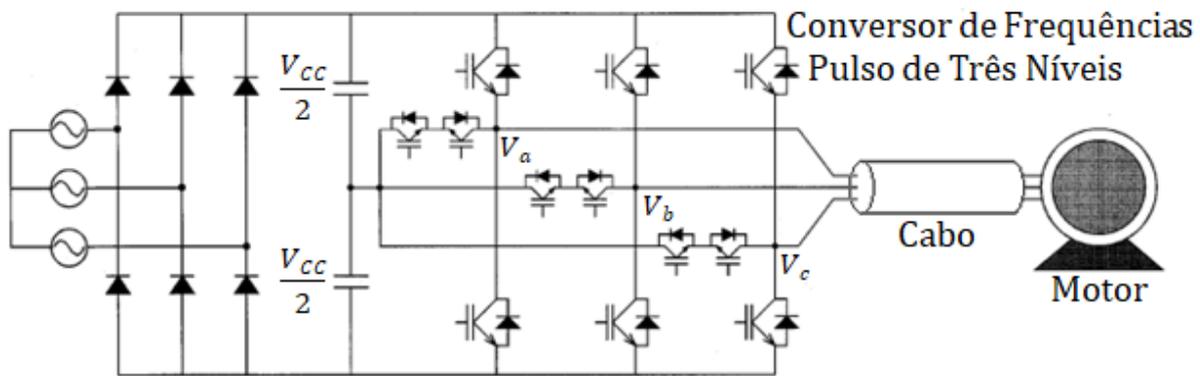
Se o resistor de pré-inserção estiver bem dimensionado, de forma que o valor da sua resistência R seja suficiente para reter considerável parcela da tensão do barramento do gerador no primeiro estágio de carregamento da linha; e que o intervalo de inserção Δt seja suficientemente longo para ser maior do que duas vezes o tempo de propagação da onda no cabo, os valores de sobretensão que geralmente são da ordem de 2 p.u. podem ser reduzidos para valores abaixo de 1,5 p.u. (D'AJUZ, 1987; ZANETTA, 2003).

Apesar de obter bons resultados para a energização de linhas de transmissão, os resistores de pré-inserção têm sua atuação limitada quase que somente à energização de linhas longas, uma vez que por questões construtivas o seu tempo de manobra Δt é fixo e de ordem de grandeza de milissegundos, muito maior do que o tempo de manobra que seria necessário para atuar na redução da sobretensão de motores acionados por conversores de frequências modernos. Ainda assim, essa estratégia serve como inspiração para as estratégias que serão apresentadas nas subseções a seguir.

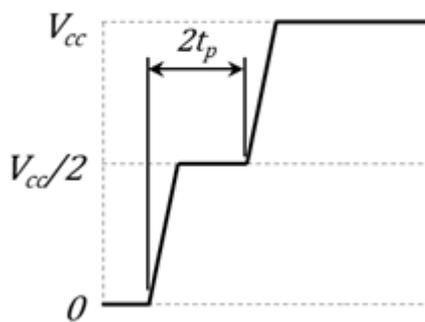
4.5.2.2. Superposição de Pulsos com Conversor de Frequências de Três Níveis

(LEE; NAM, 2002) propõem uma estratégia semelhante à vista na seção anterior, porém aplicável a sistemas de acionamento de motores. Trata-se de um sistema simples composto por conversor de frequências-cabo elétrico-motor, porém, dotado de um conversor de frequências que emite pulsos de três níveis: 0, $V_{cc}/2$ e V_{cc} .

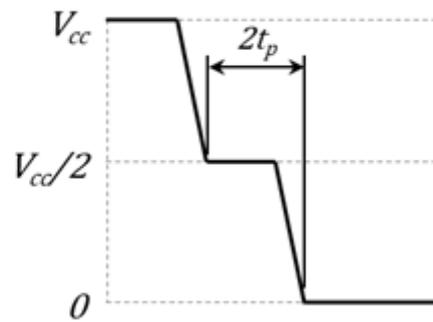
Em um primeiro momento, o pulso é lançado em nível intermediário, com amplitude de tensão de valor $V_{cc}/2$, trafegando no cabo elétrico um pulso de amplitude $V_p/2$. Quando esse pulso atingir os terminais do motor irá ocasionar uma sobretensão de amplitude $(V_p/2)(\Gamma_m + 1)$, geralmente inferior ao valor de V_p . Esse pulso será refletido nos terminais do motor e seguirá em direção aos terminais do conversor de frequências com amplitude $\Gamma_m V_p/2$. No momento em que o pulso refletido atinge os terminais do conversor ele é novamente refletido, e dessa vez o pulso refletido terá a sua polaridade invertida e apresentará valor negativo de amplitude de tensão $\Gamma_m \Gamma_f V_p/2$.



(a)



(b)



(c)

Figura 20 - Configuração do acionamento do motor por conversor de frequências de três níveis

(a) esquemático, (b) forma de onda da subida do pulso e (c) forma de onda da descida do pulso

Fonte: Adaptado de (LEE; NAM, 2002)

Se nesse exato momento em que o pulso é refletido nos terminais do conversor de frequências com amplitude negativa, o pulso lançado pelo conversor alternar de nível intermediário (amplitude $V_{cc}/2$) para o nível alto (amplitude V_{cc}), é equivalente a lançar um novo pulso de amplitude de tensão positiva $V_p/2$ no cabo. Dessa forma, haverá uma superposição de pulsos com interferência destrutiva, em que o novo pulso lançado de amplitude positiva $V_p/2$ é subtraído do valor de amplitude negativa $\Gamma_m \Gamma_f V_p/2$ do pulso refletido. O resultado é a propagação em direção aos terminais do motor de um pulso de amplitude positiva, porém baixa, com o valor $(1 - \Gamma_m \Gamma_f)V_p/2$.

Como geralmente $0 < \Gamma_m < 1$ e $-1 < \Gamma_f < 0$, logo $-1 < \Gamma_m \Gamma_f < 0$; e por consequência $0 < (1 + \Gamma_m \Gamma_f) < 1$. Dessa forma, o pulso resultante $(1 + \Gamma_m \Gamma_f)V_p/2$ tem amplitude positiva e menor do que $V_p/2$, o que implica em redução significativa da amplitude

do pulso refletido resultante que é propagado no cabo, e, conseqüentemente, resulta em redução da amplitude da sobretensão.

Vale ressaltar que a impedância do conversor de frequências, vista pelos seus terminais, Z_f , varia em função do nível de tensão do pulso emitido, por causa das diferentes combinações dos estados das chaves semicondutoras. Essa variação tem uma pequena influência no valor de Γ_f , uma vez que, em geral, Z_f é muito menor do que Z_c . Nesse trabalho, essa variação não será levada em consideração.

A Figura 21 e a Figura 22 apresentam os diagramas de treliças, com formulação dos pulsos no domínio do tempo e no domínio das frequências, para o caso já descrito, quando é lançado um pulso de nível intermediário e amplitude de tensão $V_p/2$ e a transição para o nível alto, de amplitude de tensão V_p , ocorre após um período de tempo $2t_p$, período em que esse pulso leva para ser refletido no motor e depois novamente refletido no conversor.

O diagrama de blocos que descreve esse caso, com a adição de um pulso no instante $2t_p$, é apresentado na Figura 23.

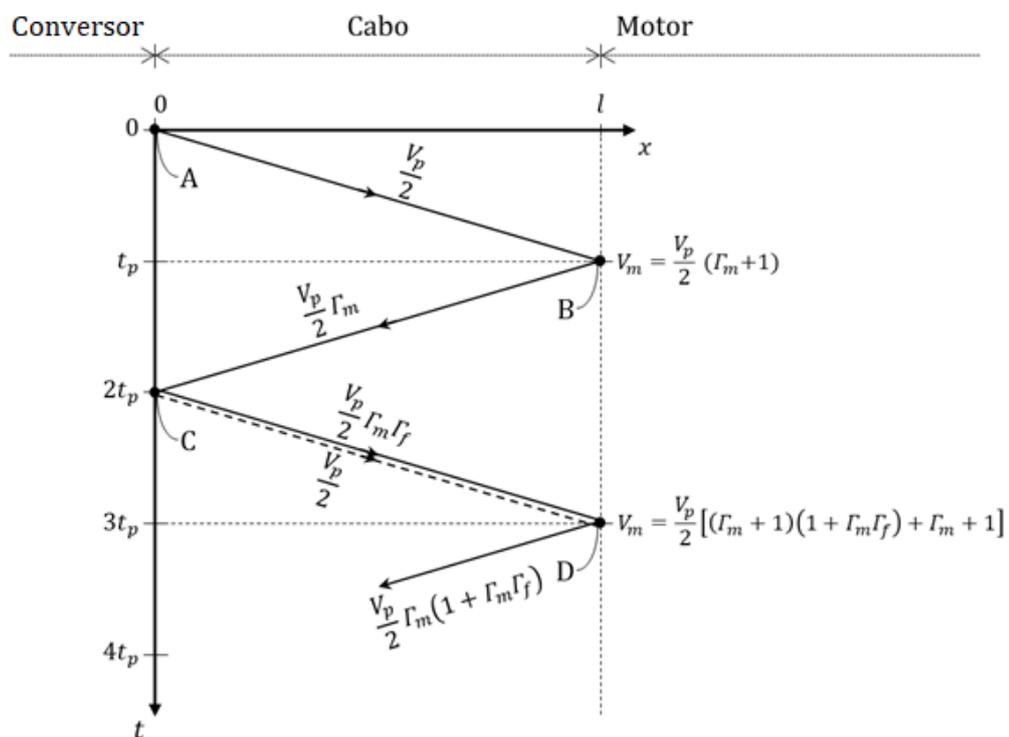


Figura 21 - Diagrama de treliças para o lançamento de dois pulsos por um conversor de três níveis, com intervalo de tempo de $2t_p$

Fonte: Adaptado de (LEE; NAM, 2002)

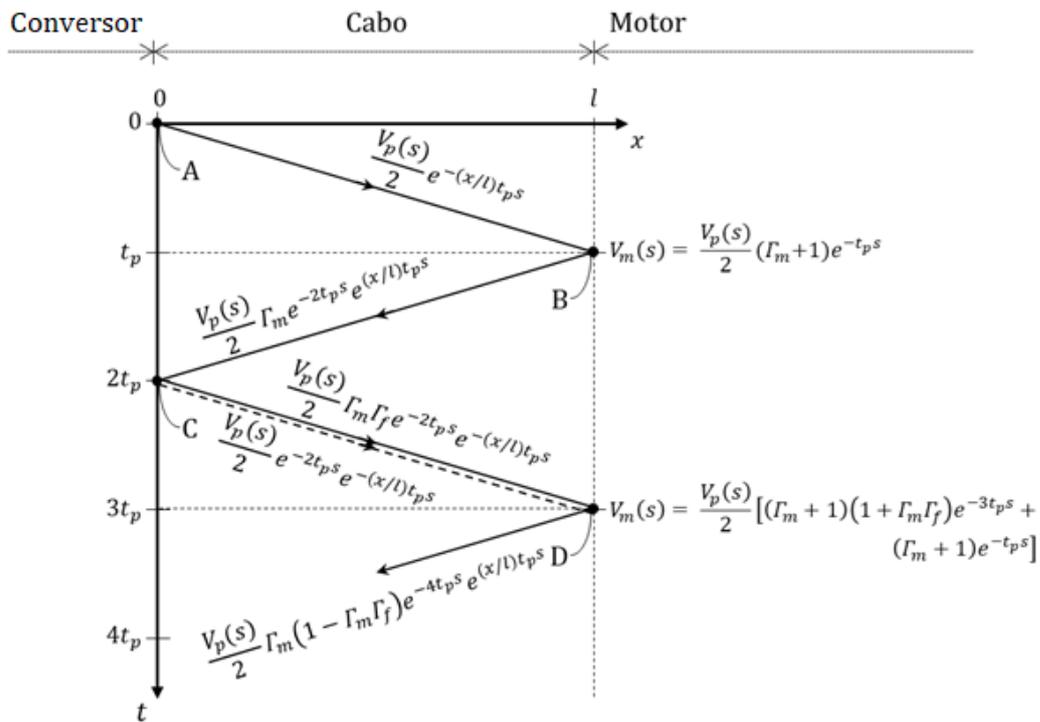


Figura 22 - Diagrama de treliças para o lançamento de dois pulsos por um conversor de três níveis, com intervalo de tempo de $2t_p$, representados no domínio das frequências

Fonte: Adaptado de (LEE; NAM, 2002)

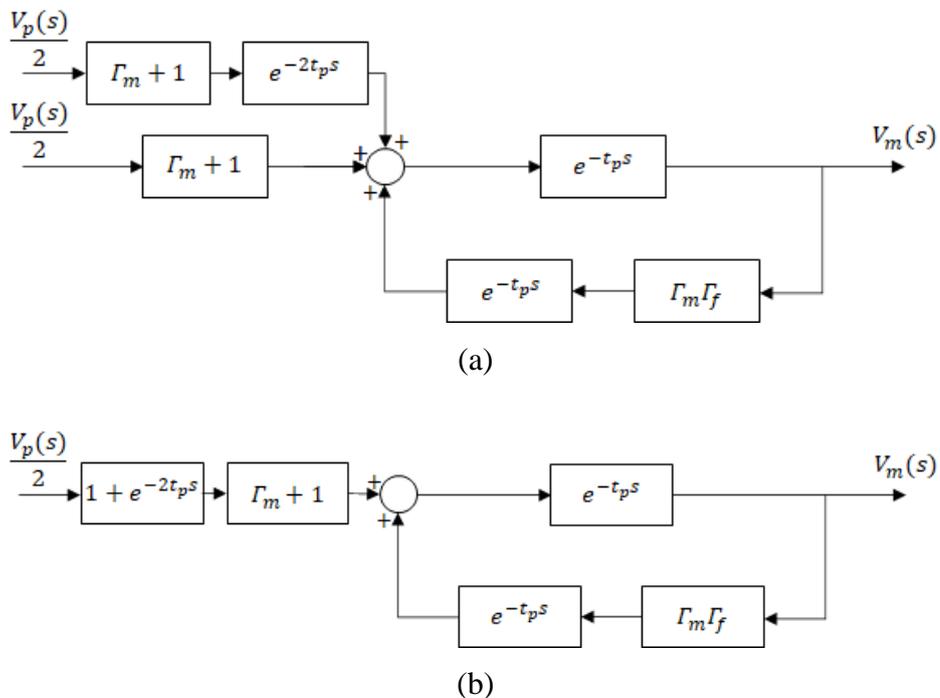


Figura 23 - Diagrama de blocos da função de transferência do transitório da sobretensão para o lançamento de dois pulsos com intervalo de $2t_p$

(a) representando os dois pulsos (b) simplificado

É possível ressaltar no diagrama de blocos que na ramificação de entrada o bloco de função $1 + e^{-2t_p s}$ representa os dois pulsos gerados pelo conversor, espaçados no tempo por um intervalo $2t_p$, cada um de amplitude $V_p(s)/2$, conforme representado na entrada do diagrama. De forma análoga ao diagrama de blocos apresentado na Figura 13, o bloco de função $\Gamma_m + 1$ representa o aumento da tensão nos terminais do motor no momento da primeira reflexão de pulso, os blocos de função $e^{-t_p s}$ representam o tempo t_p de propagação dos pulsos no cabo e o bloco de função $\Gamma_m \Gamma_f$ que representa a iteração de cada reflexão sequencial do pulso nos terminais do motor e nos terminais do conversor.

Para fins de ilustração, a Figura 24 apresenta a curva comparativa da sobretensão sem a aplicação de qualquer tratamento para sua redução e a sobretensão resultante da aplicação do método descrito nesta subseção. Foram utilizados os parâmetros apresentados na Tabela 3 e simulados no Simulink[®] os modelos matemáticos descritos nos diagramas de bloco da Figura 13 e da Figura 23. Nesse caso, a redução do pico de amplitude da sobretensão foi de 1,800 p. u. para 1,078 p. u.. Como o valor de referência é a tensão em regime permanente, que é 0,999 p. u., a redução da sobretensão foi de 90,14%.

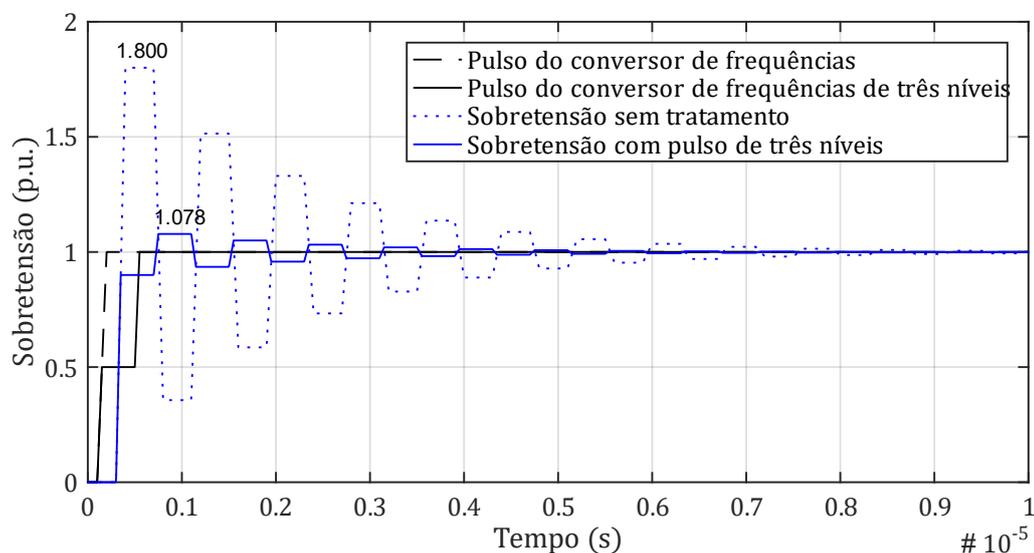


Figura 24 - Sobretensão para o pulso de três níveis com transição dos estágios em intervalo de $2t_p$

Procedimento análogo ao utilizado na subida do pulso, representado na Figura 20 (b), deve ser utilizado na descida do pulso, representado na Figura 20 (c).

É importante ressaltar que o método de redução da sobretensão por superposição de pulsos não se baseia, somente, em um envio de pulso de amplitude menor, nível intermediário,

e de depois o envio do pulso em amplitude maior, nível alto. É uma combinação de envio de pulsos em momentos diferentes e o intervalo correto entre o envio desses pulsos. Portanto, pode-se sumarizar como a adoção de uma estratégia de chaveamento do conversor de frequências para a emissão de pulsos em intervalos de tempo devidamente determinados. Uma discussão mais aprofundada sobre a adoção de intervalos de tempo diferentes entre os pulsos e seus efeitos na redução da sobretensão será apresentada na Seção 6.

4.5.2.3. Superposição de Pulsos com Conversores de Frequências em Paralelo

(KORHONEN et al., 2010) apresenta uma configuração diferente da apresentada na seção anterior, mas que faz uso da mesma estratégia coordenada de chaveamento dos conversores.

A configuração proposta apresenta conversores de frequência de pulsos de dois níveis (baixo e alto, respectivamente 0 e V_{cc}) em paralelo, conectados à cabos de mesmo comprimento e junção conjunta nos terminais do motor. A Figura 25 apresenta essa configuração de forma genérica e a Figura 26 apresenta a versão mais simples possível dessa configuração, com dois conversores em paralelo.

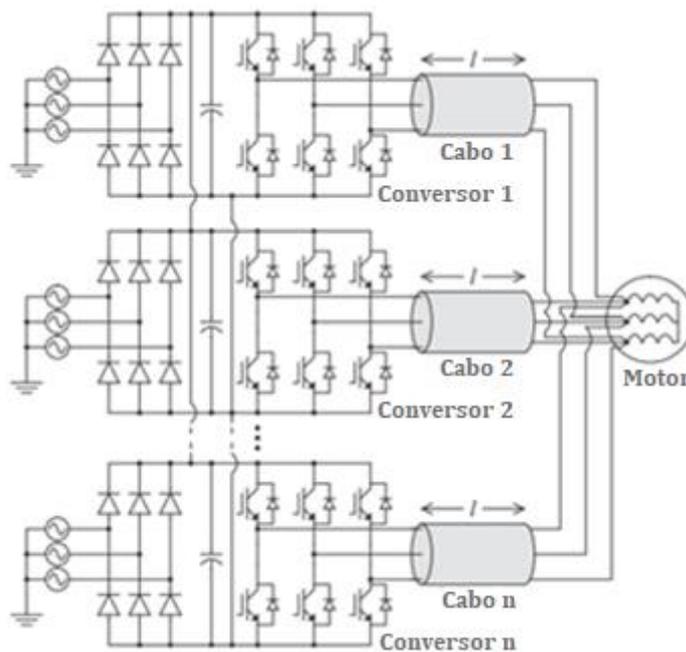


Figura 25 - Configuração de acionamento de motor com conversores em paralelo

Fonte: Adaptado de (KORHONEN et al., 2010)

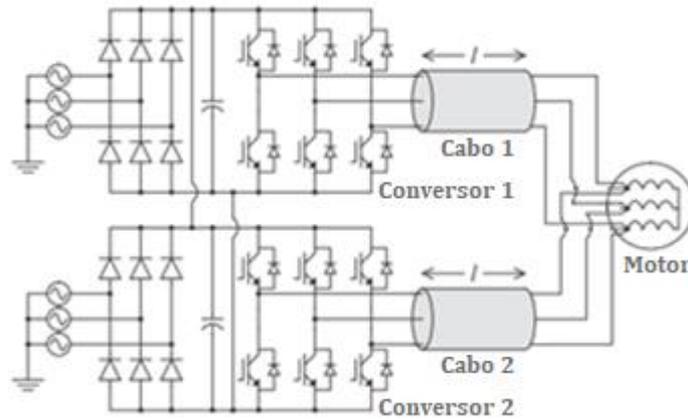


Figura 26 - Configuração de acionamento de motor com dois conversores de dois níveis em paralelo

Fonte: Adaptado de (KORHONEN et al., 2010)

Nessa configuração, a estratégia de chaveamento dos conversores para a emissão de pulsos deve ser conjunta. Cada um dos conversores emite pulso em nível alto, porém, em momentos diferentes, estabelecidos por essa estratégia de chaveamento. Para quantidades pares de conversores em paralelo, novamente, o intervalo de tempo entre a emissão dos pulsos é $2t_p$. Para quantidades ímpares de conversores, também deve haver disparo de pulsos de alguns conversores no intervalo de tempo $2t_p$ após o primeiro pulso, mas alguns conversores, também, devem disparar pulsos no instante t_p após o primeiro pulso.

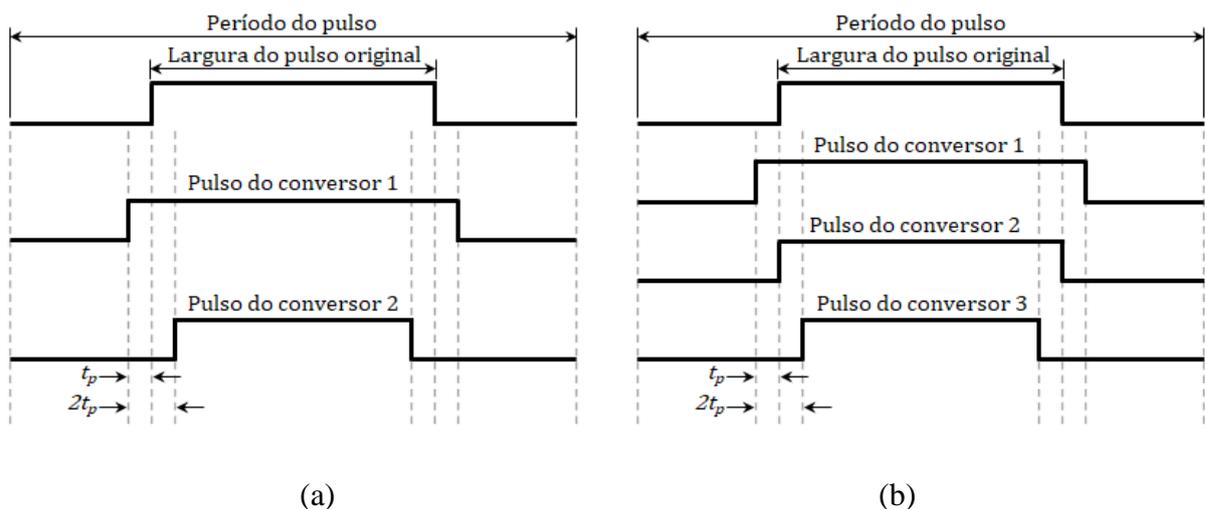


Figura 27 - Estratégias conjuntas de chaveamento de conversores em paralelo

(a) pulsos para dois conversores em paralelo e (b) pulsos para três conversores em paralelo

Fonte: Adaptado de (KORHONEN et al., 2010).

Uma característica positiva para a redução da sobretensão é que, sob o ponto de vista do primeiro pulso incidente no ponto de junção dos cabos, tanto os cabos como a carga estão em configuração de linhas radiais, portanto, no ponto comum de interligação dos cabos e da carga, a onda de tensão “enxergará” uma impedância distinta da impedância da carga (CARDOSO, 2011). Na prática, quando o primeiro pulso alcançar os terminais do motor as impedâncias dos cabos conectados aos demais conversores estarão em paralelo com a impedância do motor. Dessa forma, a impedância equivalente tem valor menor do que a impedância do motor e a impedância dos cabos. Assim, o coeficiente de reflexão nessa condição é reduzido, menor do que zero. Conseqüentemente a sobretensão no momento da chegada desse primeiro pulso nos terminais do motor, também, tem amplitude reduzida, menor até do que a amplitude do pulso. A Figura 28 apresenta os esquemáticos simplificados dos circuitos elétricos, para o caso de dois conversores em paralelo.

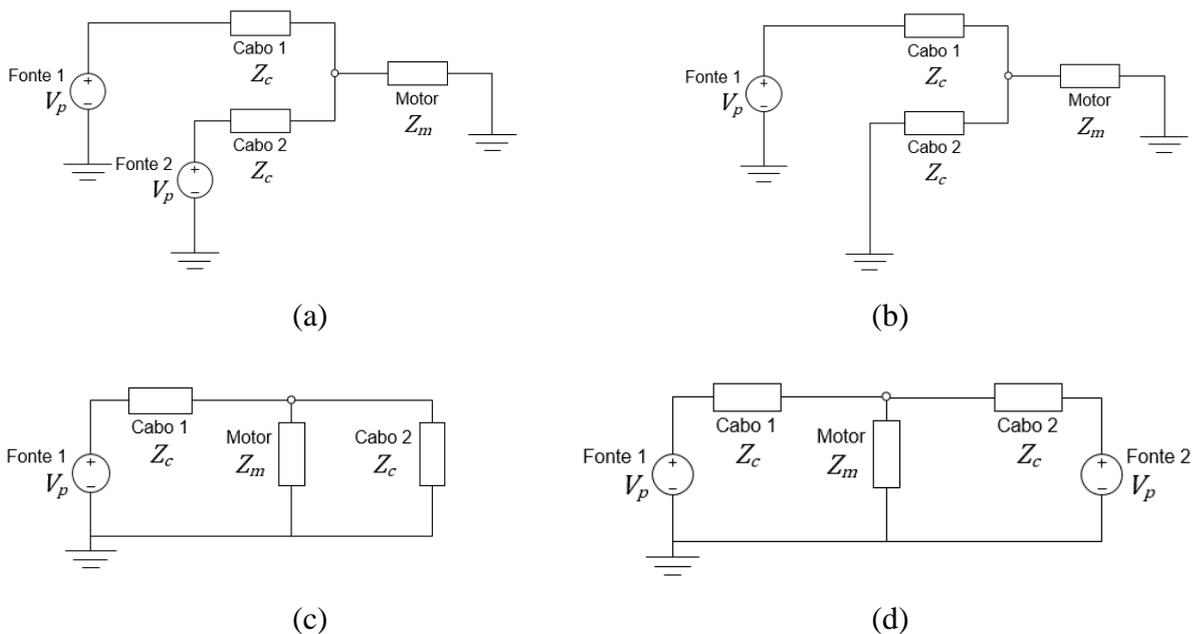


Figura 28 - Representação por circuitos elétricos da configuração com conversores em paralelo

(a) configuração que utiliza dois conversores de frequências em paralelo, (b) a mesma configuração, no momento após a emissão do pulso pelo primeiro conversor, (c) a versão simplificada, logo após a emissão do pulso pelo primeiro conversor e (d) a versão simplificada após a emissão do pulso pelo segundo conversor

Tomando como exemplo a configuração com dois conversores em paralelo, considerando as condições de que a impedância do motor Z_m é maior do que a impedância do cabo Z_c , e que o conversor de frequência emite no cabo um pulso de amplitude V_p , as Equações (36), (37), (38) e (39) descrevem, respectivamente, a impedância equivalente, o coeficiente de

reflexão, o coeficiente de transmissão e a sobretensão no momento da reflexão do pulso emitido pelo primeiro conversor:

$$Z_{m//c} = Z_{eq} = \frac{Z_m Z_c}{Z_m + Z_c} < Z_c < Z_m \quad (36)$$

$$\Gamma_{m//c} = \frac{Z_{m//c} - Z_c}{Z_{m//c} + Z_c} = \frac{-Z_c^2}{2Z_m Z_c + Z_c^2} = -\frac{Z_c}{2Z_m + Z_c} < 0 \quad (37)$$

$$\gamma_{m//c} = \frac{2Z_{m//c}}{Z_c + Z_{m//c}} = \frac{2Z_m Z_c}{2Z_m Z_c + Z_c^2} = \frac{2Z_m}{2Z_m + Z_c} > 0 \quad (38)$$

$$V_{m(m//c)} = V_p(1 + \Gamma_{m//c}) < V_p \quad (39)$$

Ainda analisando a versão mais simples dessa configuração, com dois conversores em paralelo, conforme Figura 26, é possível observar que após a incidência nos terminais do motor do pulso V_p , emitido pelo conversor 1 no instante de tempo $t = 0$, há uma reflexão de pulso no cabo 1, de volta ao conversor 1 de amplitude $V_p \Gamma_{m//c}$, menor do que V_p , e de polaridade negativa. Nesse mesmo momento, também, ocorre a propagação do pulso $V_p \gamma_{m//c}$ para o cabo 2, em direção ao conversor 2. Ambos os pulsos, quando refletidos nos conversores, no instante $t = 2t_p$ sofrerão uma inversão de polaridade, dessa forma, do conversor 1 retornará para os terminais do motor um pulso de polaridade positiva e amplitude baixa $V_p \Gamma_{m//c} \Gamma_f$ e do conversor 2 retornará um pulso de polaridade negativa e amplitude alta $V_p \gamma_{m//c} \Gamma_f$. A fim de reduzir a tensão resultante da somatória desses dois pulsos nos terminais do motor, deve-se, no instante $t = 2t_p$, acionar a emissão de um segundo pulso, pelo conversor 2, de amplitude V_p e polaridade positiva. A Figura 29 apresenta o diagrama de treliças desse processo de emissão e reflexão de pulsos.

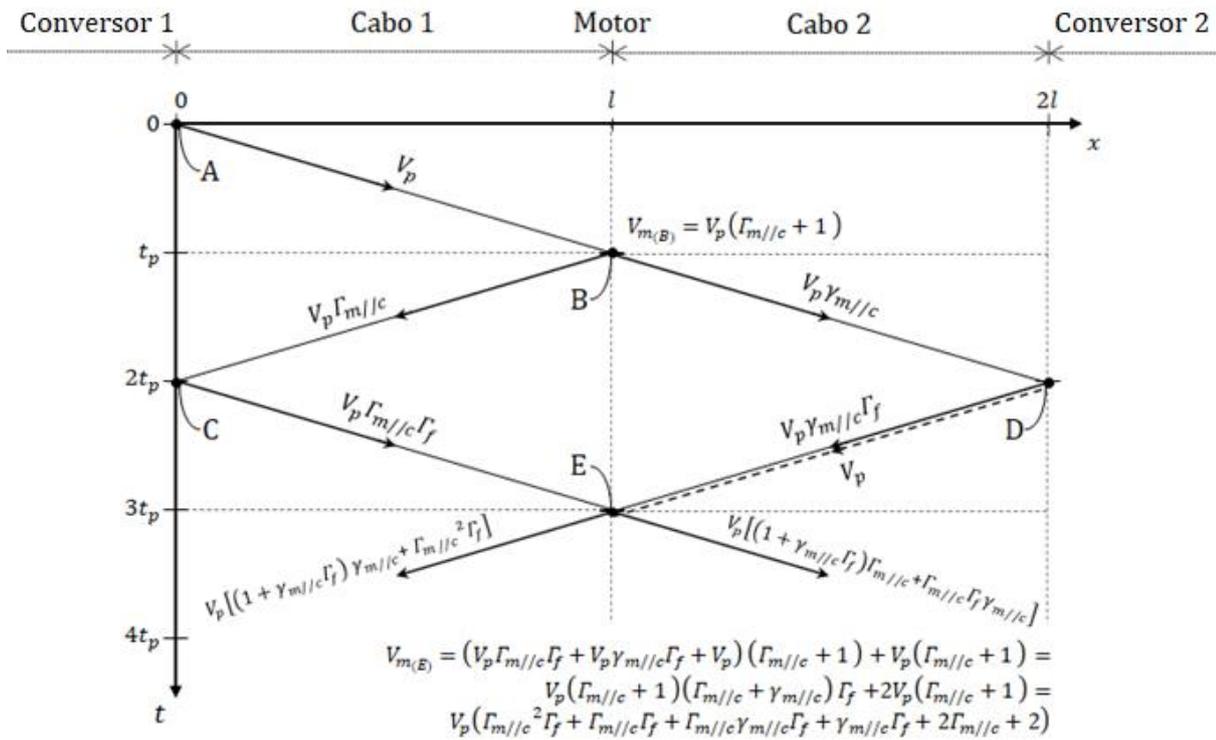


Figura 29 - Diagrama de treliças para a configuração com dois conversores em paralelo

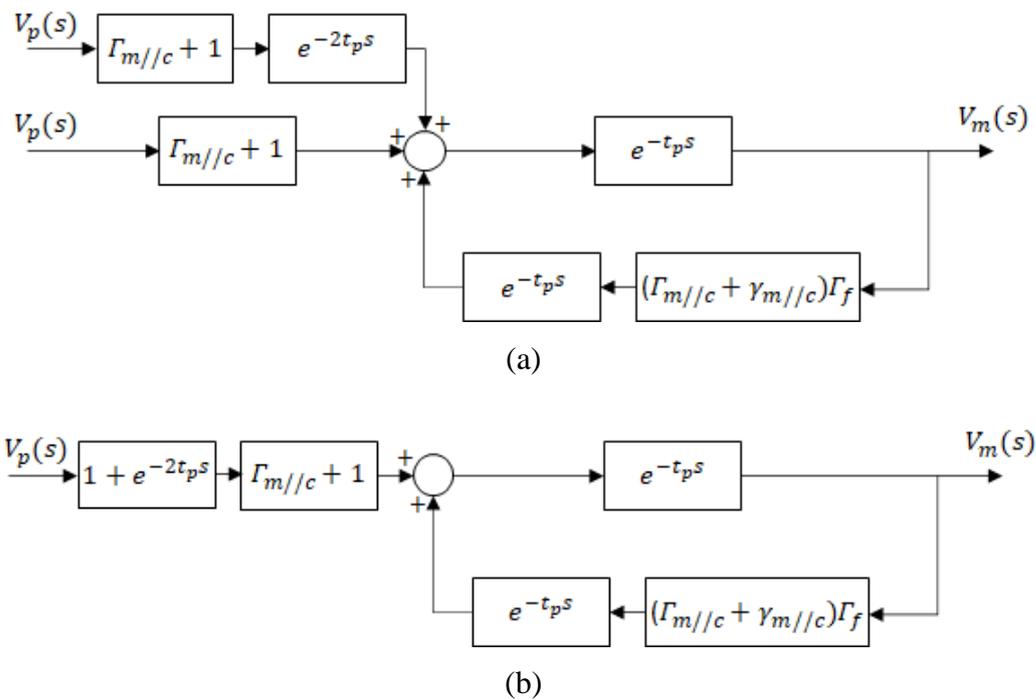


Figura 30 - Diagrama de blocos da sobretensão com dois conversores em paralelo e pulsos com intervalo de $2t_p$

(a) representando os dois pulsos (b) simplificado

A Figura 30 apresenta o diagrama de blocos que descreve esse caso, de dois conversores em paralelo, com o lançamento de pulsos separados por um intervalo de tempo de $2t_p$.

De forma análoga aos diagramas de blocos apresentados na Figura 13 e na Figura 23, o bloco de função $1 + e^{-2t_p s}$ representa os dois pulsos gerados pelo conversor, separados por um intervalo de tempo $2t_p$ e com amplitude $V_p(s)$, o bloco de função $\Gamma_{m//c} + 1$ representa a alteração da amplitude desses pulsos de entrada no momento da sua primeira reflexão nos terminais do motor, os blocos de função $e^{-t_p s}$ representam o tempo t_p de propagação dos pulsos no cabo e o bloco na ramificação de retorno, de função $(\Gamma_{m//c} + \gamma_{m//c})\Gamma_f$, representa a iteração de cada reflexão sequencial dos pulsos nos terminais do motor e nos terminais dos conversores. O fator $(\Gamma_{m//c} + \gamma_{m//c})$ explicita que a cada iteração retornam aos terminais do motor um pulso que foi refletido para um dos cabos ($\Gamma_{m//c}$) e um pulso que foi transmitido para o outro cabo ($\gamma_{m//c}$).

Para fins de ilustração, a Figura 31 apresenta a curva comparativa da sobretensão sem a aplicação de qualquer tratamento para sua redução e a sobretensão resultante da aplicação do método descrito nesta subseção, para o caso específico de dois conversores em paralelo. Foram simulados no Simulink[®] os modelos matemáticos representados pelos diagramas de blocos da Figura 13 e da Figura 30, utilizando os parâmetros apresentados na Tabela 3. Nesse caso, a redução do pico de amplitude da sobretensão foi de 90,39%.

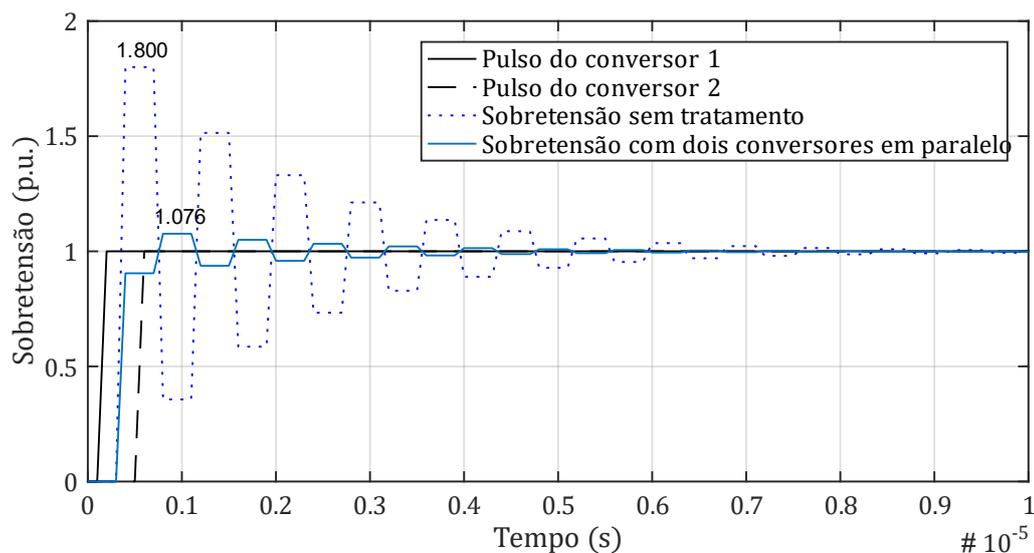


Figura 31 - Sobretensão para dois conversores em paralelo com intervalo de $2t_p$ entre os pulsos

Para o caso de três conversores em paralelo, os pulsos são lançados em um intervalo de tempo de t_p , ou seja, o pulso do primeiro conversor é lançado em $t = 0$, o pulso do segundo conversor é lançado em $t = t_p$ e o pulso do terceiro conversor é lançado em $t = 2t_p$.

Como esse arranjo possui mais um conversor de frequências e mais um cabo elétrico em paralelo com os demais, as impedâncias vistas pelos pulsos no ponto de conexão conjunta dos cabos nos terminais do motor é diferente daquela observada no caso anterior. O mesmo acontece para os coeficientes de reflexão e de transmissão. As Equações (40), (41), (42) e (43) apresentam, respectivamente, a impedância equivalente, o coeficiente de reflexão, o coeficiente de transmissão e a sobretensão nos terminais do motor após a reflexão do primeiro pulso. A notação será com o subscrito $m//2c$ que representa a impedância vista sob o ponto de vista do primeiro pulso, que enxerga a impedância do motor em paralelo com a impedância de dois cabos elétricos, também em paralelo.

$$Z_{m//2c} = Z_{eq} = \frac{Z_m Z_c}{2Z_m + Z_c} < Z_c < Z_m \quad (40)$$

$$\Gamma_{m//2c} = \frac{Z_{m//2c} - Z_c}{Z_{m//2c} + Z_c} = \frac{-Z_m Z_c - Z_c^2}{3Z_m Z_c + Z_c^2} = -\frac{Z_m + Z_c}{3Z_m + Z_c} < 0 \quad (41)$$

$$\gamma_{m//2c} = \frac{2Z_{m//2c}}{Z_c + Z_{m//2c}} = \frac{2Z_m Z_c}{3Z_m Z_c + Z_c^2} = \frac{2Z_m}{3Z_m + Z_c} > 0 \quad (42)$$

$$V_{m(m//2c)} = V_p(1 + \Gamma_{m//2c}) < V_p \quad (43)$$

A Figura 32 e a Figura 33 apresentam respectivamente o diagrama de treliças e o diagrama de blocos da sobretensão para a configuração com três conversores em paralelo.

Esse diagrama de blocos é idêntico àquele apresentado na Figura 30, com exceção do bloco na ramificação de retorno, que apresenta função $(\Gamma_{m//c} + 2\gamma_{m//2c})\Gamma_f$, ao invés de $(\Gamma_{m//c} + 2\gamma_{m//c})\Gamma_f$, isso ocorre porque a iteração de reflexão sequencial dos pulsos nos terminais do motor e nos terminais do conversor, retorna aos terminais do motor um pulso que foi refletido para um dos cabos ($\Gamma_{m//c}$) e dois pulsos que foram transmitidos para os outros dois cabos ($2\gamma_{m//2c}$).

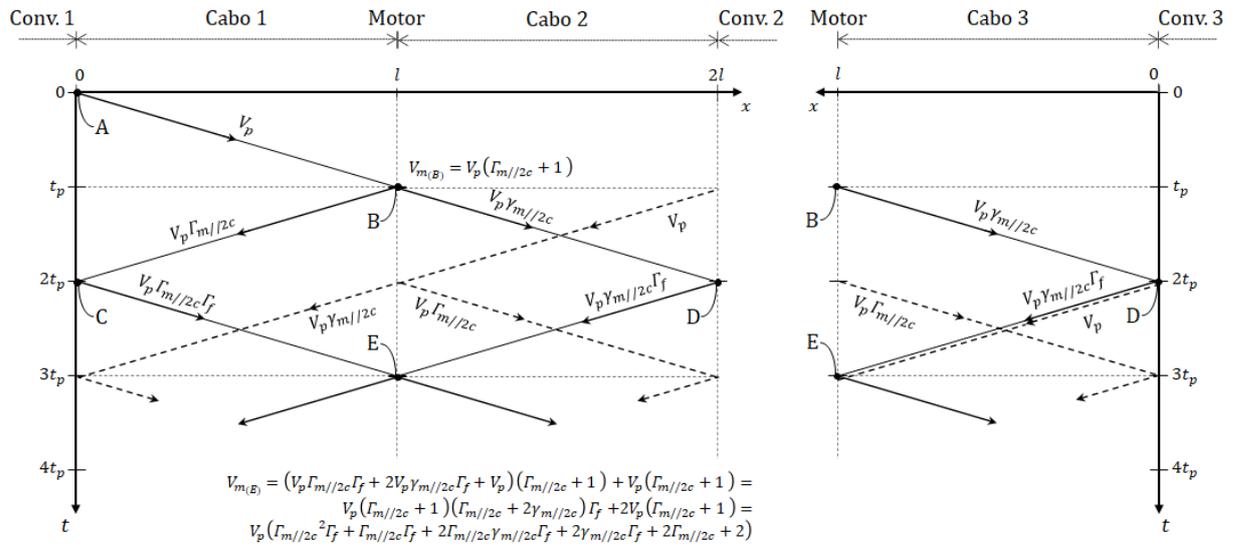


Figura 32 - Diagrama de treliças para a configuração com três conversores em paralelo

Novamente, para fins de ilustração, a Figura 34 apresenta a curva comparativa da sobretensão sem qualquer tratamento e a sobretensão resultante da aplicação do método de três conversores em paralelo. Foram simulados no Simulink[®] os modelos matemáticos representados pelos diagramas de blocos das Figura 13 e Figura 33, utilizando os parâmetros apresentados na Tabela 3. Nesse caso, a redução do pico de amplitude da sobretensão foi de 59,80%.

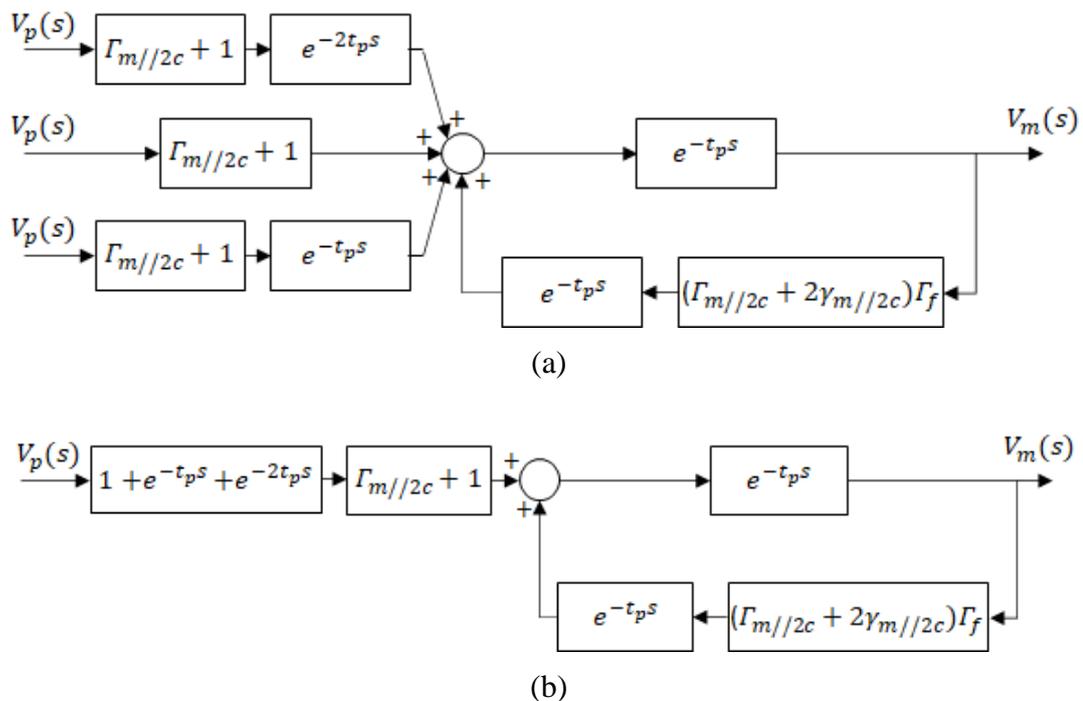


Figura 33 - Diagrama de blocos da sobretensão com três conversores em paralelo e pulsos com intervalo de $2t_p$

(a) representando os três pulsos (b) simplificado

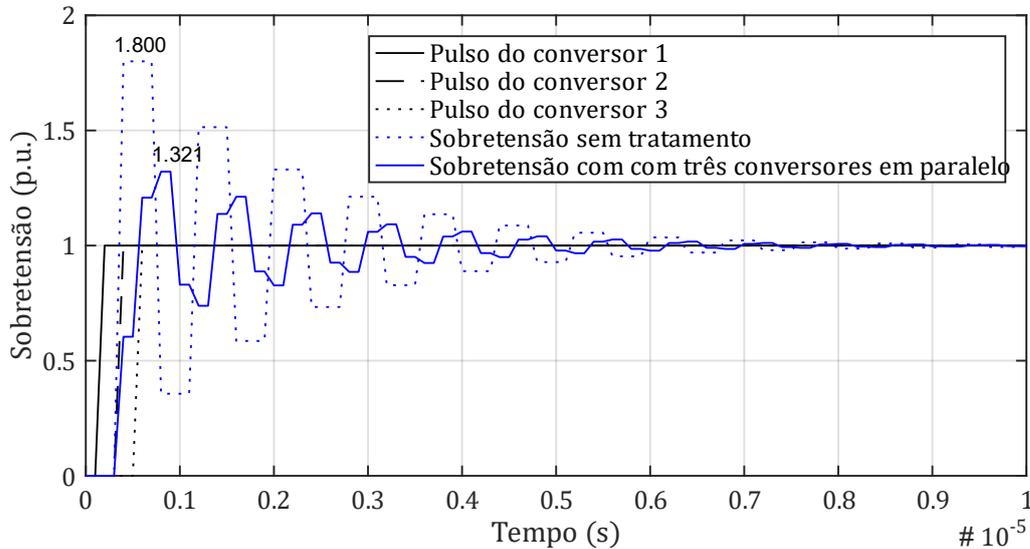


Figura 34 - Sobretensão para três conversores em paralelo com intervalo de $2t_p$ entre os pulsos

Na Seção 6 serão apresentadas discussões mais detalhadas sobre a adoção de maior número de conversores em paralelo, apresentando, também, seu impacto na redução da sobretensão.

4.5.2.4. Superposição de Pulsos com Conversor de Frequências de Três Níveis, com Nível Intermediário de Tensão Ajustado

(LEE, 2006) apresenta um cenário teórico em que a sobretensão possa ser completamente suprimida, baseado em duas hipóteses, são elas:

- iii. Um conversor de frequências de três níveis que possua a amplitude do seu nível de tensão intermediário (V_{cc_interm}) ajustada de tal forma que, quando o pulso emitido por esse nível intermediário no cabo (V_{interm}) for refletido nos terminais do motor, ocasione uma sobretensão de amplitude idêntica à amplitude da tensão nos terminais do motor em regime permanente; e
- iv. Esse primeiro pulso de nível intermediário, após ser refletido nos terminais do motor, quando for refletido, novamente, no conversor ($V_{interm}\Gamma_m\Gamma_f$), tenha polaridade negativa e amplitude idêntica à do pulso que será emitido pelo

conversor na transição do nível intermediário para o nível alto do pulso ($V_p - V_{interm}$).

Construiremos esse cenário partindo de um sistema de acionamento de motor simples, composto por um conversor de frequências de três níveis acionando um motor, ambos interligados por um cabo. A particularidade fica por conta da estrutura do conversor de frequências, que apresenta o nível intermediário da tensão ajustável, representado por V_{cc_interm} . Os níveis baixo e alto de tensão do conversor têm respectivamente amplitude 0 e V_{cc} , conforme apresentado na Figura 35. Consideraremos que o primeiro pulso do conversor, de tensão V_{cc_interm} , será emitido no instante de tempo $t = 0$.

Da hipótese (i) espera-se um cenário em que, com uma única reflexão do primeiro pulso nos terminais do motor, a tensão nos terminais do motor já alcance a sua amplitude de regime permanente. Com o auxílio da Equação (6), a amplitude do pulso transmitido ao cabo em razão dessa tensão intermediária do barramento do conversor, V_{cc_interm} , pode ser descrita pela Equação (44). A tensão desse pulso refletido nos terminais do motor, com o auxílio da Equação (5), pode ser descrita pela Equação (45).

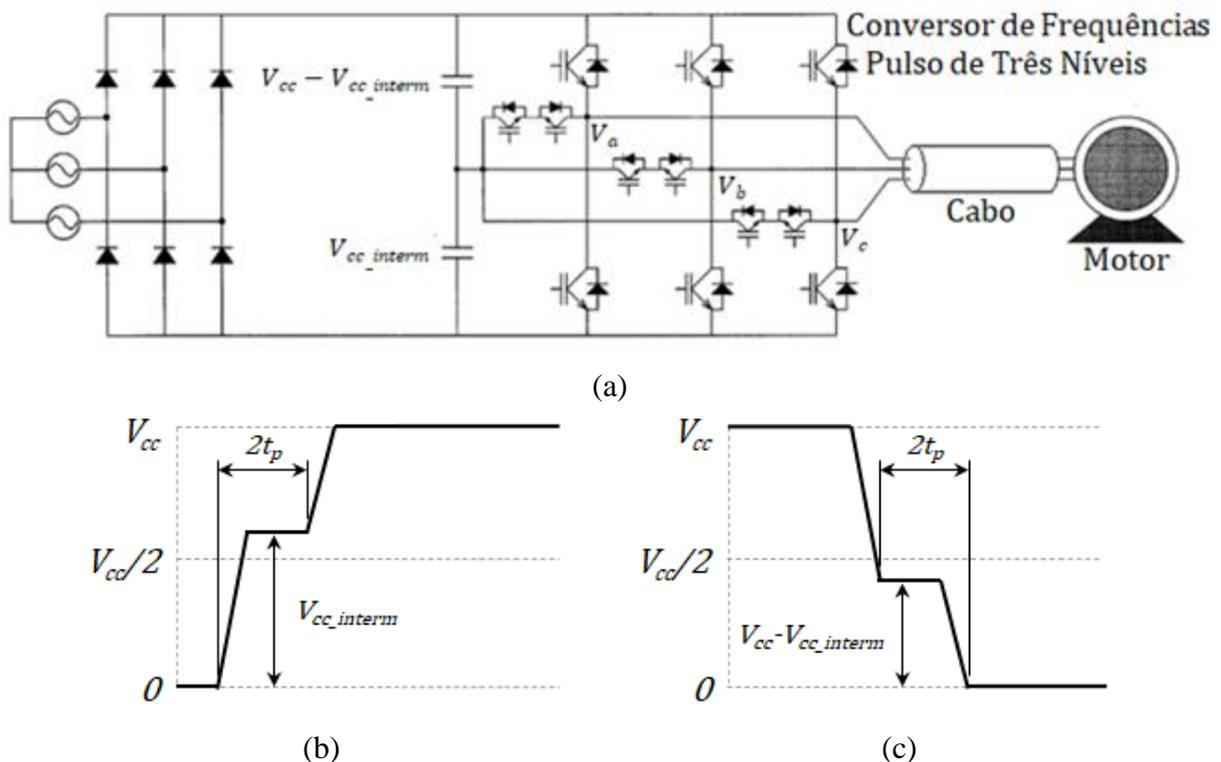


Figura 35 - Configuração do acionamento do motor por conversor de frequências de três níveis e nível intermediário ajustado

(a) esquemático, (b) forma de onda da subida do pulso e (c) forma de onda da descida do pulso

Fonte: Adaptado de (LEE; NAM, 2002) e (LEE, 2006)

$$V_{interm} = V_{cc_interm} \frac{Z_c}{Z_f + Z_c} \quad (44)$$

$$V_m = V_{interm}(1 + \Gamma_m) = V_{interm} \left(\frac{2Z_m}{Z_m + Z_c} \right) \quad (45)$$

Considerando a hipótese (i) e igualando a tensão gerada pelo primeiro pulso à tensão em regime permanente, descrita pela Equação (9), temos:

$$V_{mRP} = \frac{V_{cc}Z_m}{Z_f + Z_m} = V_{interm} \left(\frac{2Z_m}{Z_m + Z_c} \right) \quad (46)$$

Como desdobramento dessa equação temos:

$$V_{interm} = \frac{V_{cc}}{2} \left(\frac{Z_m + Z_c}{Z_m + Z_f} \right) \quad (47)$$

$$V_{cc_interm} = V_{cc} \frac{(Z_m + Z_c)(Z_f + Z_c)}{2Z_c(Z_m + Z_f)} \quad (48)$$

Dessa forma, considerando a Equação (48), a hipóteses (i) é verdadeira e a reflexão do pulso gerado por essa tensão V_{cc_interm} do conversor ocasiona nos terminais do motor uma tensão de amplitude idêntica à tensão em regime permanente.

Dando sequência, espera-se que o pulso de amplitude V_{interm} , que foi emitido pelo conversor ao cabo no instante de tempo $t = 0$, alcançará os terminais do motor no instante $t = t_p$, sofrerá reflexão, o pulso refletido de amplitude $V_{interm}\Gamma_m$ alcançará os terminais do conversor no instante $t = 2t_p$, será novamente refletido, agora em direção ao motor, com amplitude $V_{interm}\Gamma_m\Gamma_f$.

Segundo a hipótese (ii), espera-se que no instante $t = 2t_p$ o conversor emita um novo pulso ($V_{pulso_2t_p}$), de amplitude igual à diferença entre a amplitude de tensão do nível intermediário V_{cc_interm} e amplitude da tensão do nível alto V_{cc} , ou seja $V_{cc} - V_{cc_interm}$; e que esse pulso será capaz de anular o pulso que está sendo refletido no conversor nesse momento ($V_{refl_conv_2t_p}$), de amplitude $V_{interm}\Gamma_m\Gamma_f$.

O pulso refletido no conversor $V_{refl_conv_2t_p}$ pode ser representado em razão das impedâncias do sistema e da tensão de entrada do conversor da seguinte forma:

$$V_{refl_conv_2t_p} = V_{interm} \Gamma_m \Gamma_f = \frac{V_{cc}}{2} \left(\frac{Z_m - Z_c}{Z_m + Z_f} \right) \left(\frac{Z_f - Z_c}{Z_f + Z_c} \right) \quad (49)$$

Da mesma forma, o pulso emitido pelo conversor em $t = 2t_p$, $V_{pulso_2t_p}$, pode ser representado da seguinte forma no cabo:

$$V_{pulso_2t_p} = \frac{(V_{cc} - V_{cc_interm})Z_c}{Z_f + Z_c} = V_p - V_{interm} = \frac{V_{cc}}{2} \frac{Z_m Z_c + Z_f Z_c - Z_m Z_f - Z_c^2}{(Z_m + Z_f)(Z_f + Z_c)} \quad (50)$$

Que também pode ser escrita da seguinte forma:

$$V_{pulso_2t_p} = -\frac{V_{cc}}{2} \left(\frac{Z_m - Z_c}{Z_m + Z_f} \right) \left(\frac{Z_f - Z_c}{Z_f + Z_c} \right) \quad (51)$$

Logo, a somatória desses dois pulsos é nula:

$$V_{pulso_2t_p} + V_{refl_conv_2t_p} = 0 \quad (52)$$

Portanto, a hipótese (ii), também, é verdadeira. E no instante $t = 2t_p$ o pulso emitido pelo conversor anula completamente o pulso que estava sendo refletido no cabo. Dessa forma, as reflexões no cabo se extinguem e não há um transitório de sobretensão nos terminais do motor.

É importante destacar que, no momento da descida do pulso, um processo análogo precisa ser realizado para a completa supressão da sobretensão. A Figura 35 (a) representa a subida do pulso e a Figura 35 (b) representa a descida do pulso.

A Figura 36 apresenta o diagrama de treliças para o método apresentado nessa seção e a Figura 37 apresenta o diagrama de blocos.

A Figura 38 ilustra de forma comparativa a curva da sobretensão sem qualquer tratamento, e a sobretensão resultante da aplicação do método utilizando o conversor de três

níveis com o nível intermediário de tensão ajustado. Os resultados foram obtidos por meio de simulação no Simulink[®] dos modelos matemáticos representados pelos diagramas de blocos da Figura 13 e Figura 37, utilizando-se os parâmetros apresentados na Tabela 3. Nesse caso, não há qualquer sobretensão, portanto, a redução do pico de amplitude da sobretensão foi de 100%.

Discussões mais detalhadas sobre esse método, serão apresentadas na Seção 6.

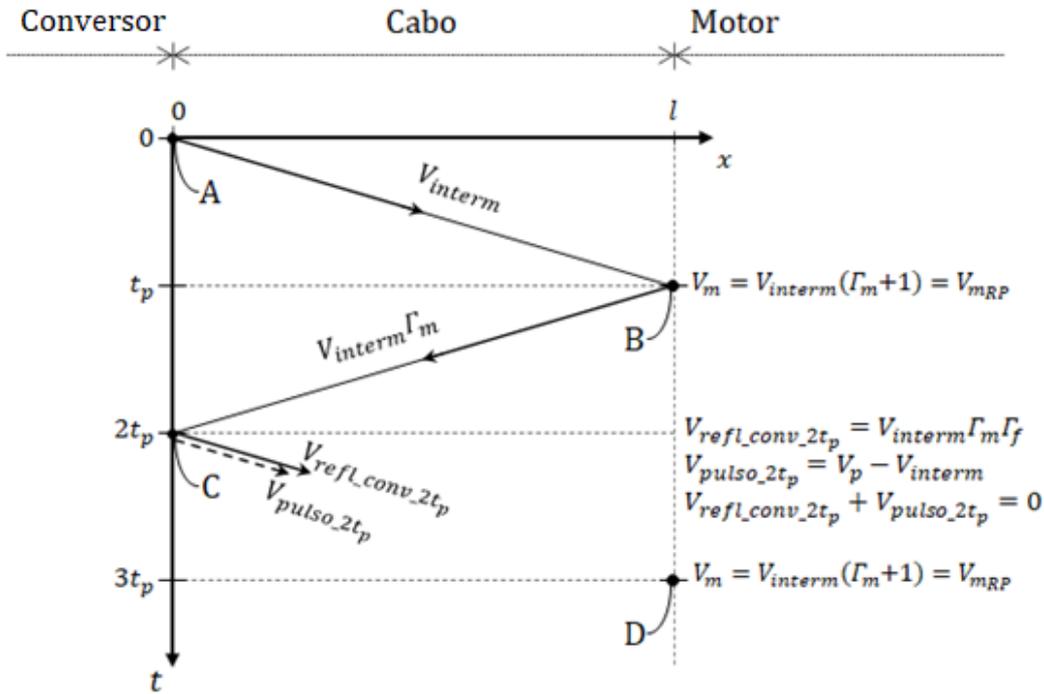
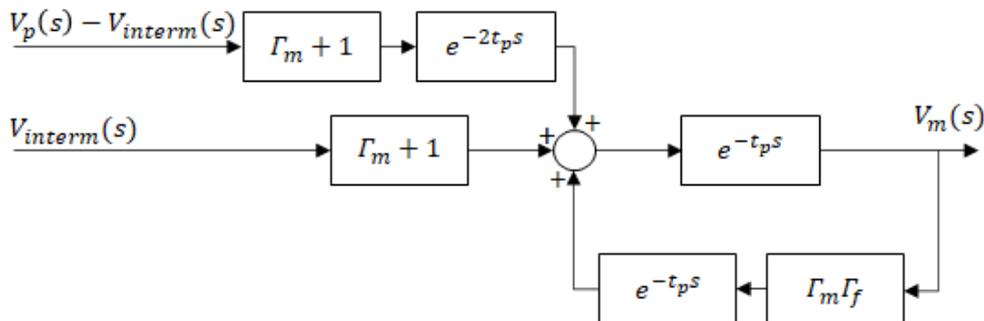


Figura 36 - Diagrama de treliças para o lançamento de dois pulsos por um conversor de três níveis e nível intermediário ajustado, com intervalo de tempo de $2t_p$



(a)

Figura 37 - Diagrama de blocos da função de transferência do transitório da sobretensão para o lançamento de dois pulsos de amplitude distintas e com intervalo de $2t_p$

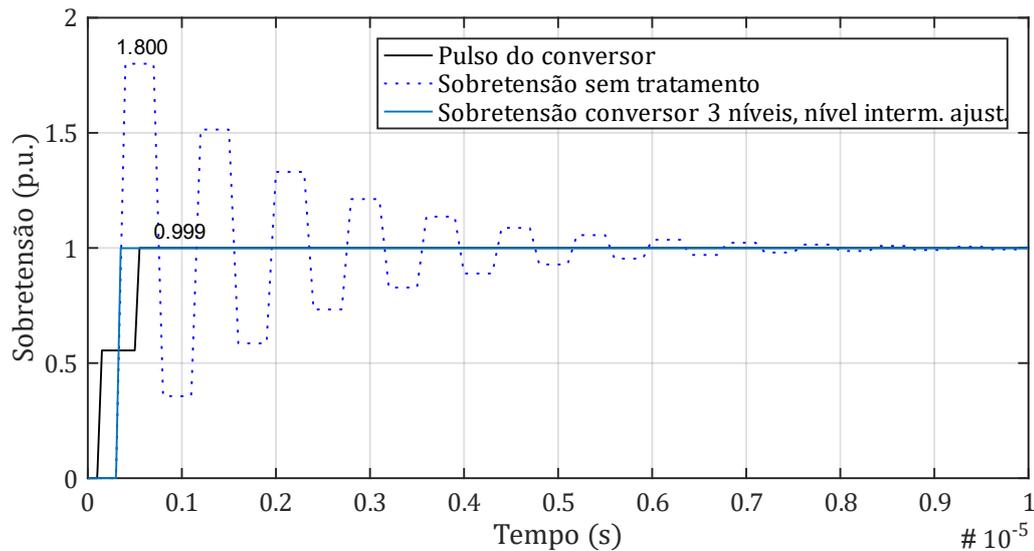


Figura 38 - Sobretensão para o pulso de três níveis com nível intermediário ajustado e intervalo entre os pulsos de $2t_p$

4.6. Modelo de Simulação e Dependência das Frequências

Os métodos de redução da sobretensão apresentados na subseção 4.5 foram todos ilustrados por simulações que consideraram todas as impedâncias do sistema como puramente resistivas. Essa é uma simplificação válida para fins didáticos e de exposição dos mecanismos de funcionamento de cada um dos métodos de redução da sobretensão. Nessa subseção, será apresentado um modelo físico mais apurado do sistema, levando-se em conta os efeitos capacitivos e indutivos do cabo elétrico e do motor elétrico, e a influência desses parâmetros dependentes da frequência na sobretensão.

4.6.1. Modelo do Cabo Elétrico

Já existem na literatura técnica e científica modelos consagrados para a representação aproximada de cabos elétricos por meio de circuitos elétricos de parâmetros concentrados ou parâmetros distribuídos. Destaque para os modelos do tipo π e do tipo T , representados na Figura 39, capazes de descrever com certa precisão o tempo de propagação dos pulsos, a alteração da forma de onda, a atenuação e as perdas.

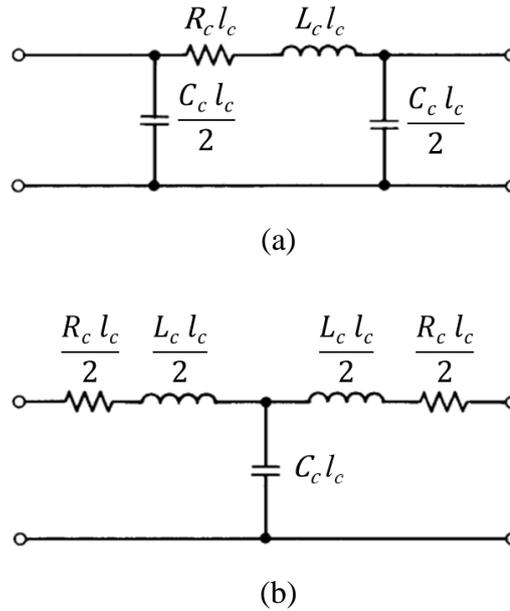


Figura 39 - Modelos de representação de cabos elétricos

(a) modelo π e (b) modelo T

Fonte: Adaptado de (PAUL, 2006)

Os parâmetros apresentados na Figura 39 são: o comprimento do cabo l_c , a resistência do cabo por unidade de comprimento R_c , a indutância do cabo por unidade de comprimento L_c e a capacitância do cabo por unidade de comprimento C_c .

Esses modelos podem ser representados por parâmetros concentrados, utilizando um único segmento π ou T , ou por parâmetros distribuídos, utilizando mais de um segmento π ou T em série. Segundo (PAUL, 2006) os modelos de parâmetros concentrados apresentam boa representação de cabos elétricos e linhas de transmissão até as frequências da ordem de grandeza em que o comprimento da onda λ seja do mesmo tamanho do comprimento do cabo l_c , nesses casos o cabo é considerado eletricamente curto. Para relações em que o comprimento do cabo é maior do que o comprimento da onda, deve-se utilizar mais segmentos π ou T para representar esse cabo por parâmetros distribuídos. É considerada uma boa prática utilizar um segmento de π ou T para cada décimo do comprimento de onda que ocupe o comprimento do cabo, ou seja:

$$n_{seg.\pi} = \frac{10l_c}{\lambda} \tag{53}$$

Essa boa prática é reforçada por (CARDOSO, 2011) que preconiza o uso de modelo de parâmetros concentrados sempre que $l_c < 0,01\lambda$, o uso do modelo de parâmetros distribuídos

sempre que $l_c > 0,1\lambda$ e uma solução de compromisso entre complexidade e precisão, nos caso em que $0,01\lambda < l_c < 0,1\lambda$.

Ainda segundo (PAUL, 2006), para o caso de pulsos, é preciso levar em conta componentes de frequência elevada presentes na subida do pulso e relacionadas a esse tempo de subida.

$$f = \frac{1}{\pi t_s} \quad (54)$$

Para as frequências mais elevadas, e conseqüentemente comprimentos de onda menores, é recomendável aumentar o número de segmentos do modelo. Caso contrário, os modelos π e T , podem apresentar características de um filtro passa-baixa.

Ainda a respeito dessa relação entre a boa representação de frequências elevadas e a quantidade de segmentos dos modelos π e T , a oscilação das sobretensões tendem a alcançar frequências elevadas, uma vez que elas são caracterizadas pelo tempo que o pulso leva para percorrer o comprimento do cabo quatro vezes. Como essa velocidade de propagação, em geral, é próxima de metade da velocidade da luz, esse período é bem curto, implicando em frequências de oscilação elevadas.

Uma discussão mais detalhada sobre o modelo de simulação é apresentada na subseção 6.1.

4.6.2. Modelo do Motor Elétrico

Em razão da frequência de oscilação da sobretensão ser elevada e de os pulsos de tensão gerados pelo conversor de frequências apresentarem componentes de frequências elevadas, o modelo para representação do motor elétrico precisa ser adequado a essas condições. Nesse intuito, (MOREIRA et al., 2002) propõe o modelo de parâmetros concentrados do motor de indução apresentado na Figura 40.

Os parâmetros concentrados apresentados na Figura 40 e seus significados físicos são: R_g é a resistência que representa as perdas de dissipação na carcaça do motor, C_g é a capacitância entre os enrolamentos e a terra e entre a o terminal de entrada da fase e a terra, R_t , C_t e L_t representam respectivamente a resistência, a capacitância e a indutância entre as espiras dos enrolamentos, R_e é a resistência que representa as perdas por correntes de Foucault no núcleo magnético do motor, relacionadas ao transitório de frequências elevadas da sobretensão,

e L_d é a indutância de eixo direto, relacionada à indutância de dispersão do motor. Não há referência de parâmetros relacionados às perdas por histerese.

De forma simplificada, a indutância de eixo direto está relacionada às componentes de baixa frequência e as demais resistências, capacitâncias e indutâncias estão relacionadas às componentes de frequência mais elevada (MOREIRA et al., 2002).

Uma discussão mais detalhada sobre o modelo de simulação é apresentada na subseção 6.1.

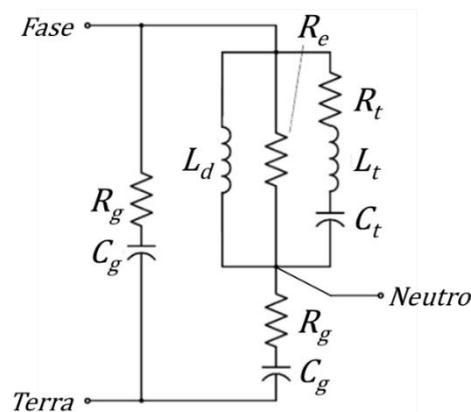


Figura 40 - Modelo de motor elétrico de indução, por fase, para frequências elevadas

Fonte: Adaptado de (MOREIRA et al., 2002, 2005)

5. METODOLOGIA

5.1. Metodologia Proposta

Propõe-se a avaliação dos métodos de redução da sobretensão apresentados na seção 4.5 por meio de simulações computacionais. As subseções seguintes detalham os tipos de simulações, as principais premissas adotadas e a forma de avaliação dos resultados.

5.2. Simulações

Os métodos de redução da sobretensão e as configurações apresentadas na seção 4.5 serão objeto de várias séries de simulações utilizando os softwares PSpice®, para simulação de circuitos elétricos, e SimuLink®, para simulação dos modelos matemáticos descritos na seção 4.4, com o intuito avaliar esses métodos de redução da sobretensão.

Para tal, serão coletados das simulações os dados referentes à tensão nos terminais do motor e os pulsos gerados no conversor. Os dados coletados serão tratados e processados, para que deles sejam extraídos os parâmetros e as informações relevantes.

Importante ressaltar que a análise dos parâmetros deverá desencadear uma discussão sobre a sua influência na sobretensão. Aspectos relevantes dos modelos de simulação adotados, também, serão alvo da discussão.

Serão executadas séries de simulações para avaliar e comparar a sobretensão em cada uma das configurações propostas. A avaliação comparativa se dará por meio parâmetros de qualidade das curvas de tensão nos terminais do motor (parâmetros de controle) como, por exemplo, tempo de subida, sobressinal (pico da sobretensão), tempo de acomodação e frequência de oscilação; que são apresentados na subseção 5.4.

Em suma, serão realizadas as seguintes séries de simulações:

- a) Simulações para a avaliação da sobretensão sem a aplicação de qualquer método de redução dessa sobretensão. Essa discussão será apresentada na subseção 6.2;
 - b) Simulações para a avaliação dos métodos passivos apresentados na seção 4.5.1. Essa discussão e os seus resultados serão apresentados na subseção 6.3;
-

- c) Simulações para testar os métodos de redução da sobretensão por superposição de pulsos (configurações apresentadas na seção 4.5.2), sejam pulsos emitidos por mais de um conversor de frequências em paralelo ou diferentes níveis de um pulso emitidos por um mesmo conversor de frequências. Essa discussão e os seus resultados serão apresentados na subseção 6.4;
- d) Simulações para testar o desempenho dos métodos de redução em uma ampla gama de diferentes comprimentos de cabo. Essa análise comparativa e a discussão dos seus resultados serão apresentados na subseção 6.5; e
- e) Simulações para a otimização de alguns parâmetros dos métodos de redução da sobretensão por superposição de pulsos e avaliação dos resultados otimizados. Essa discussão e os seus resultados serão apresentados na subseção 6.6.

5.3. Premissas das Simulações

O sistema básico das simulações é composto por conversor de frequências, cabo elétrico e motor elétrico de indução. A condição inicial é o sistema completamente desenergizado e o motor em repouso. A fim de observar condições mais críticas de sobretensão, o motor observado será de pequeno porte (3 *hp*), com exceção à uma simulação da Seção 6.2, no qual será apresentada a sobretensão em um motor de médio porte (25 *hp*).

Qualquer tipo de motor pode ser alvo de estudos de sobretensão, não só motores de indução. A presente dissertação se limitará a analisar os motores de indução utilizando o modelo proposto por (MOREIRA et al., 2002) para a observação de componentes de frequências elevadas nesse tipo de motor.

As simulações poderão utilizar dois tipos de modelos: um denominado modelo simplificado e outro denominado modelo completo.

Quando o objetivo da simulação for observar com clareza os fenômenos de reflexões de pulsos e, de forma mais didática, observar tudo o que ocorre no sistema de acionamento do motor, o modelo simplificado será adotado. Esse modelo apresenta as seguintes simplificações:

- As capacitâncias e indutâncias dos componentes são ignoradas, as impedâncias são puramente resistivas;
-

- As perdas e a atenuação dos pulsos no cabo elétrico são ignoradas, os cabos são considerados transmissores perfeitos, com características puramente resistivas;
- A subida dos pulsos emitidos pelo conversor de frequências é uma rampa linear, os pulsos são todos trapezoidais; e
- A impedância interna do conversor de frequências não varia em função do estado (aberto/fechado) das chaves semicondutoras.

Dessa forma, as simulações do sistema simplificado não serão uma representação precisa do sistema físico de acionamento do motor. No entanto, algumas dessas simplificações causam pouco impacto no resultado da simulação. Por exemplo, a representação da subida dos pulsos emitidos pelo conversor por uma rampa linear, que simplifica as nuances da curva real de subida do pulso, que pouco interferem na forma de onda da tensão no motor. A atenuação dos sinais no cabo favorece o processo de amortecimento da sobretensão, porém, não impacta muito no desempenho dos métodos de redução do pico da sobretensão. A perda de fidelidade da simulação utilizando o modelo simplificado se justifica, justamente, pela simplificação desta simulação e pela facilidade de observação dos resultados.

Para obtenção de resultados mais precisos e fiéis ao fenômeno físico da sobretensão, observando as alterações das formas de onda, atenuação e perdas, serão realizadas simulações utilizando o modelo completo. Esse é um modelo que utiliza a representação do cabo elétrico por modelo π de parâmetros distribuídos e utiliza o modelo de representação do motor elétrico de indução para frequências elevadas proposto por (MOREIRA et al., 2002, 2005). Esse modelo, porém, também, tem suas simplificações:

- As capacitâncias e indutâncias dos componentes internos do conversor de frequências são ignoradas, o conversor apresenta uma impedância puramente resistiva e que não varia em função do estado (aberto/fechado) das chaves semicondutoras; e
- A subida dos pulsos emitidos pelo conversor de frequências é uma rampa linear, os pulsos são todos trapezoidais.

A Figura 41 apresenta a representação do circuito elétrico do modelo simplificado e a Figura 42 apresenta a representação do circuito elétrico do modelo completo.

Na Figura 42 a variável n representa o número de segmentos π utilizados para a representação do cabo elétrico.

Algumas das simulações propostas poderão ser realizadas utilizando o modelo simplificado e o modelo completo, para melhor entendimento dos resultados e, inclusive, para fins de comparação dos dois modelos.

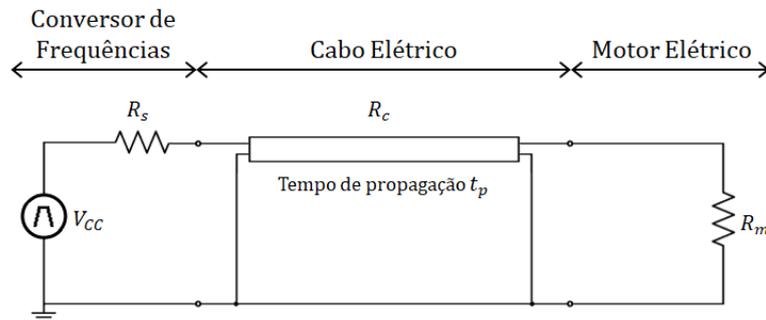


Figura 41 - Representação do circuito elétrico do modelo simplificado

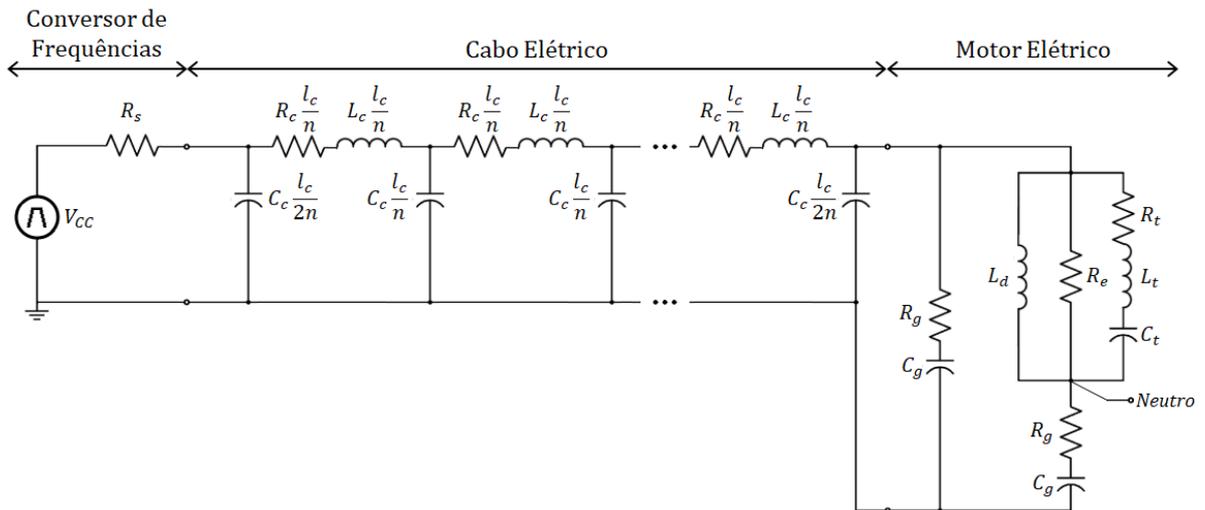


Figura 42 - Representação do circuito elétrico do modelo completo

5.4. Parâmetros Quantitativos e Qualitativos para a Avaliação das Curvas de Tensão no Motor

Os parâmetros que serão utilizados para a análise qualitativa e comparação dos resultados, são parâmetros comumente utilizados na análise de sistemas controlados. A Figura 43 representa graficamente alguns desses parâmetros em uma curva de resposta de um sistema subamortecido, que é uma curva análoga às curvas de sobretensão.

A lista a seguir descreve com mais detalhes esses parâmetros:

- Amplitude máxima da sobretensão, cujo valor é dado pelo pico do sobressinal máximo S ;
- Tempo de subida t_{s_Vm} , que é o tempo gasto para subida do sinal de um valor determinado ζ_I até ζ_F . Neste trabalho, será convencionado ζ_F como a tensão em regime permanente $V_{m_{RP}}$ e o início da contagem do tempo como o momento do disparo do pulso. Desta forma, o tempo de subida será o tempo gasto desde o disparo do pulso até o momento em que a curva da tensão no motor atinge o valor da tensão em regime permanente, pela primeira vez;
- Instante de pico t_{pico} , que indica o momento em que o sinal apresenta seu valor máximo de amplitude;
- Tempo de acomodação t_{acomod} , que é o tempo dispendido até que o sinal se acomode dentro de uma faixa de tolerância com o erro pré-determinado $\pm \varepsilon$. Será convencionado o intervalo de tolerância de $\pm 10\%$ do valor de tensão em regime permanente;
- Período de oscilação T_{osc} , é o tempo necessário para um ciclo completo de oscilação do transitório da sobretensão; e
- Frequência de oscilação, inversamente proporcional ao período de oscilação do sinal.

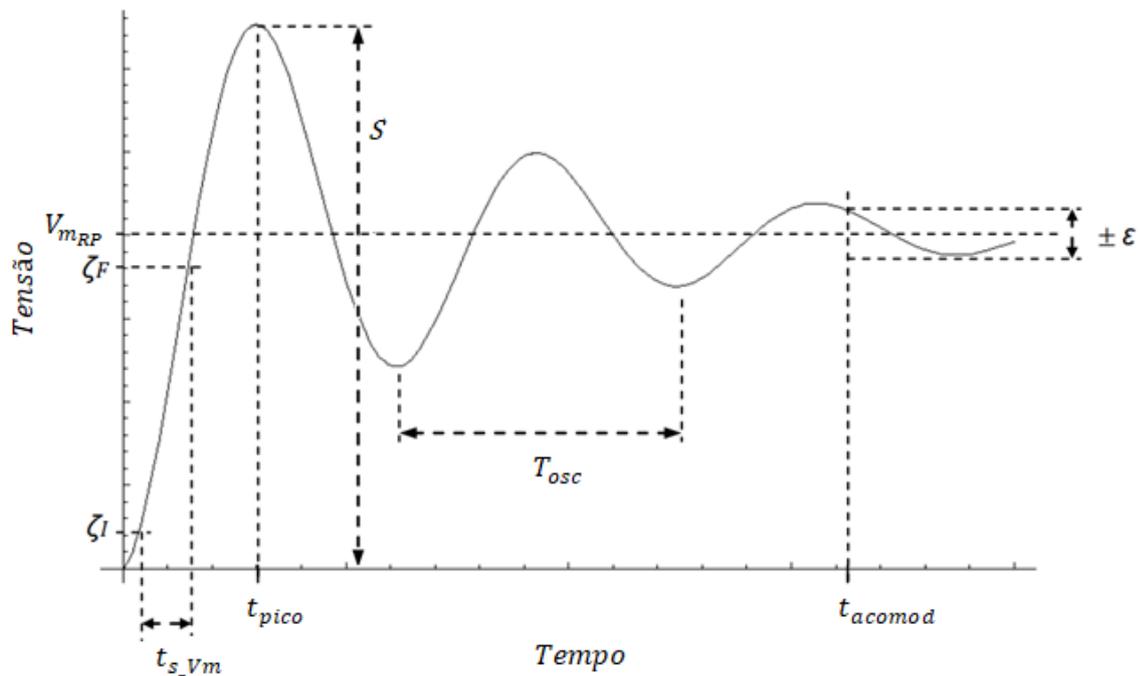


Figura 43 - Parâmetros quantitativos e qualitativos de uma curva de resposta subamortecida

Fonte: Adaptado de <https://professor.luzerna.ifc.edu.br/ricardo-kerschbaumer/wp-content/uploads/sites/43/2020/11/Aula-4-Controle-de-processos.pdf>

6. RESULTADOS

6.1. Definição do Modelo e dos Parâmetros de Simulação

Nessa subseção será apresentada uma discussão preliminar de alguns parâmetros dos modelos de simulação e serão definidos todos os demais parâmetros.

Esses parâmetros são, antecipadamente, compilados na Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8, e têm como principais fontes (VON JOUANNE; ENJETI, 1997; MOREIRA et al., 2001, 2002; YUEN; CHUNG; CHEUNG, 2012).

Tabela 4 - Parâmetros do conversor de frequências para as simulações

Parâmetros do Conversor de Frequências	Símbolo	Valor
Amplitude da tensão interna do conversor de frequências	V_{cc}	620 V
Módulo da impedância interna do conversor de frequências	Z_f ou R_s	5 Ω
Tempo de subida do pulso	t_s	80 ns
Instante de disparo do pulso	t_0	0 s
Frequência fundamental do pulso (frequência de chaveamento)	f_{ch}	10 kHz
Ciclo de trabalho (<i>duty cycle</i>)	D	0,5

Tabela 5 - Parâmetros dos motores elétricos para as simulações

Parâmetros do Motor Elétrico	Símbolo	Valores	
		Motor 3 hp	Motor 25 hp
Indutância de eixo direto	L_d	4 mH	0,41 mH
Resistência das perdas por correntes de Foucault	R_e	5,60 k Ω	1,03 k Ω
Resistência entre as espiras dos enrolamentos	R_t	1,15 k Ω	–
Capacitância entre as espiras dos enrolamentos	C_t	31,40 pF	155 pF
Indutância entre as espiras dos enrolamentos	L_t	2,70 mH	1,6 μ H
Resistência das perdas de dissipação na carcaça do motor	R_g	35,50 Ω	22,9 Ω
Capacitância entre os enrolamentos e a terra	C_g	314 pF	1550 pF
Potência do motor	P_m	3 hp	25 hp

Tabela 6 - Parâmetros do cabo elétrico para as simulações

Parâmetros do Cabo Elétrico	Símbolo	Valor
Comprimento do cabo	l_c	30,48 m ou 100 m
Resistência do cabo por unidade de comprimento	R_c	19,69 m Ω /m
Capacitância do cabo por unidade de comprimento	C_c	32,81 pF/m
Indutância do cabo por unidade de comprimento	L_c	1,18 μ H/m
Impedância característica do cabo	Z_c	189,74 Ω

Tabela 7 - Parâmetros secundários, calculados a partir dos parâmetros primários

Parâmetros Secundários	Símbolo	Valor
Coefficiente de reflexão nos terminais do conversor	Γ_f	-0,9487
Coefficiente de reflexão nos terminais do motor	Γ_m	0,9345
Coefficiente de transmissão nos terminais do motor	γ_m	1,9345
Amplitude da tensão do pulso no cabo	V_p	604,08 V ou 0,9743 p. u.
Amplitude da tensão em regime permanente	V_{mRP}	619,45 V ou 0,9991 p. u.
Amplitude da tensão ajustada do pulso intermediário do conversor	V_{cc_interm}	328,66 V ou 0,5301 p. u.
Velocidade de propagação do pulso no cabo	v	160,64 $\cdot 10^6$ m/s
Tempo de propagação do pulso através do cabo	t_p	189,74 ns (cabo de 30,48 m) 622,50 ns (cabo de 100 m)
Frequência da oscilação da sobretensão (1/4 t_p)	f_{osc}	1,32 MHz (cabo de 30,48 m) 401,61 kHz (cabo de 100 m)
Frequência da componente máxima de subida do pulso (1/ πt_s)	f_{max_ts}	3,98 MHz
Período de chaveamento do pulso	T_{ch}	100 μ s
Largura do pulso	-	50 μ s
Período da oscilação da sobretensão	T_{osc}	758,95 ns (cabo de 30,48 m) 2,49 μ s (cabo de 100 m)
Comprimento de onda da componente fundamental do pulso	λ_{fund}	16,06 km
Comprimento de onda da oscilação do pulso no cabo	λ_{osc}	121,92 m (cabo de 30,48 m) 400 m (cabo de 100 m)
Comprimento de onda da componente de frequência máxima de subida do pulso	λ_{fmax_ts}	40,37 m

Tabela 8 - Parâmetros dos filtros passivos

Parâmetros dos Filtros Passivos	Símbolo	Filtro RLC	Filtro RC
Resistência do filtro	R_f	189,74 Ω	189,74 Ω
Capacitância do filtro	C_f	75 nF	6,72 nF
Indutância do filtro	L_f	0,20 mH	-

De forma geral, os parâmetros foram definidos com o intuito de submeter os modelos de simulação a condições adversas de sobretensão e, dessa forma, possibilitar uma avaliação mais rígida dos métodos de redução de sobretensão analisados nesse trabalho.

Para o modelo simplificado as únicas diferenças são: a impedância do cabo é representada unicamente pelo módulo da impedância característica $Z_c = 189,74 \Omega$, e a impedância do motor de 3 hp é representada, unicamente, pela resistência de perdas por correntes parasitas $R_e = 5,60 k\Omega$.

6.1.1. Modelo e Parâmetros do Conversor de Frequências

No presente trabalho não serão considerados os detalhes da curva real de subida dos pulsos emitidos por conversores de frequências com chaves semicondutoras, tampouco as características dos componentes internos dos conversores.

Para fins de simulação, o conversor de frequências será representado por uma simples fonte de tensão ideal com uma impedância puramente resistiva de saída. O conversor de frequências de pulsos de dois níveis será representado por uma única fonte e o conversor de pulsos de três níveis será representado por duas fontes em série, com tempo de disparo de pulsos distintos. Os pulsos serão trapezoidais, com subida e descida linear.

Os parâmetros utilizados na representação do conversor para as simulações foram extraídos de diferentes referências, com intuito de representar condições adversas à redução da sobretensão: a tensão fase-neutro de 620 V (VON JOUANNE; ENJETI, 1997), o tempo de subida do pulso 80 ns (MOREIRA et al., 2001) e a frequência de chaveamento de 10 kHz (YUEN; CHUNG; CHEUNG, 2012). Foram definidos, também, a impedância interna vista pelos terminais do conversor com o valor de 5 Ω e o ciclo de trabalho do pulso (*duty cycle*) com o valor de 0,5 .

6.1.2. Modelo e Parâmetros do Motor Elétrico

O modelo de simulação do motor elétrico é o modelo proposto por (MOREIRA et al., 2002) para frequências elevadas, apresentado na Figura 40. Os parâmetros foram extraídos também de (MOREIRA et al., 2002), e o modelo de referência principal é o motor de indução de potência de 3 *hp*, por ter sido utilizado para a obtenção dos resultados experimentais por (MOREIRA et al., 2002) e por apresentar alta impedância, condição adversa para a sobretensão.

O modelo do motor é dependente das frequências, portanto, a sua impedância de entrada é vista com diferentes amplitudes e fases em razão das componentes de frequência que compõem o pulso. A Figura 44 apresenta a amplitude e a fase da impedância de entrada do motor de 3 *hp* (fase-terra). A Figura 45 apresenta um recorte para as frequências de chaveamento, de oscilação da sobretensão e da componente máxima de subida do pulso. A Tabela 9 apresenta o módulo da impedância de entrada do motor para essas três frequências.

A Figura 44, a Figura 45 e os valores da Tabela 9 foram obtidos por meio do cálculo numérico da impedância equivalente do modelo do motor apresentado na Figura 40. Os parâmetros utilizados são aqueles apresentados na Tabela 5.

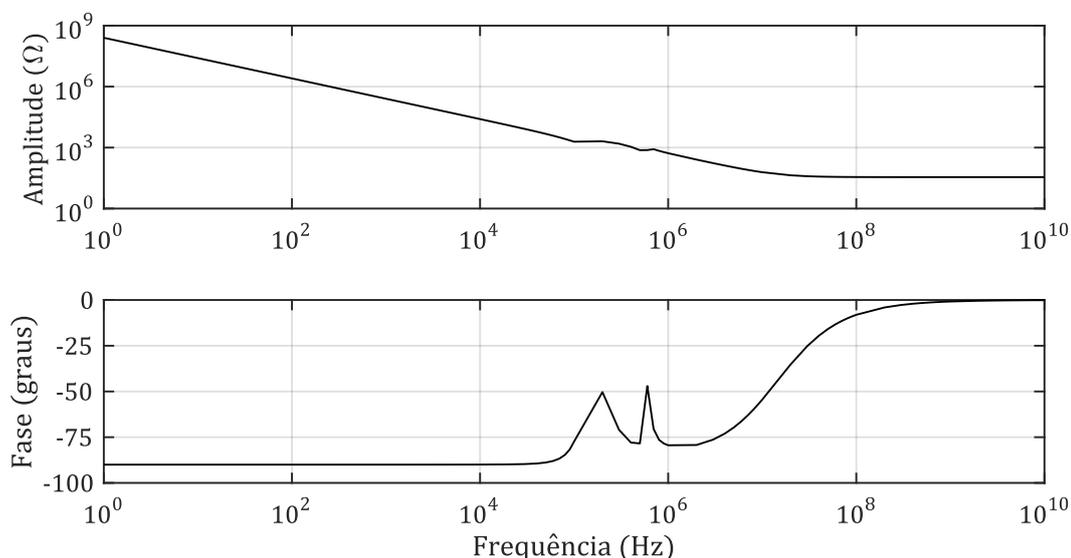


Figura 44 - Impedância de entrada do motor de 3 *hp* (fase-terra)

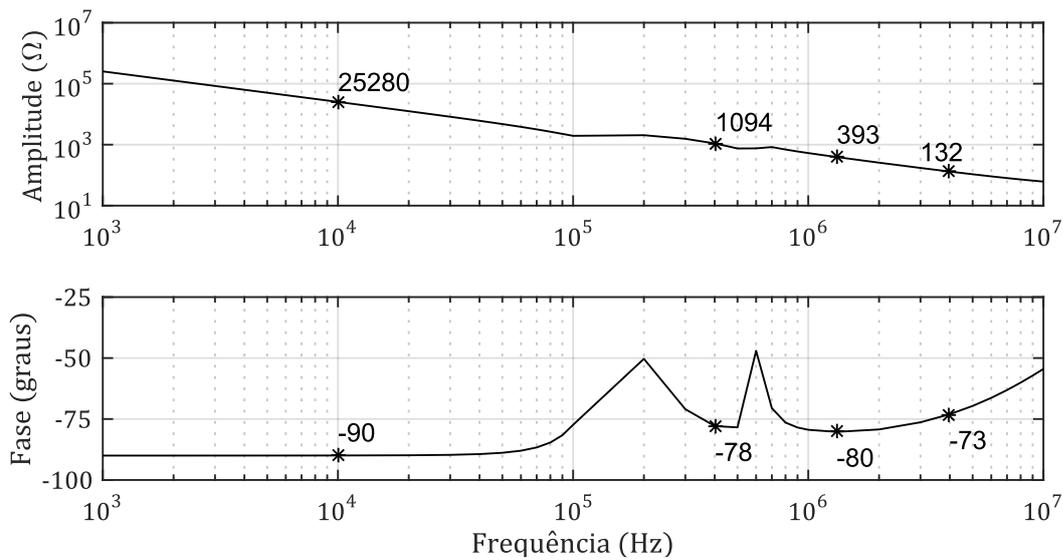


Figura 45 - Recorte da Impedância de entrada do motor de 3 hp para as principais frequências do modelo

Tabela 9 - Impedância de entrada do motor de 3 hp para as principais frequências do modelo

Parâmetros da Impedância do Motor	Símbolo	Valor
Impedância do motor para a frequência de chaveamento	Z_{mfch}	25,28 kΩ
Impedância do motor para a frequência de oscilação da sobretensão	Z_{mfosc}	392,6 Ω (cabo de 30,48 m) 1094,0 Ω (cabo de 100 m)
Impedância do motor para a componente de frequência máxima da subida do pulso	$Z_{mfmax_{ts}}$	132 Ω

6.1.3. Modelo e Parâmetros do Cabo Elétrico

O modelo de simulação adotado para o cabo elétrico é o modelo π , apresentado na Figura 39 (a). Caso necessário, o cabo poderá ser representado por diversos segmentos de parâmetros distribuídos do modelo π , como apresentado na Figura 42.

Os parâmetros de capacitância, indutância e resistência do cabo por unidade de comprimento foram extraídos de (VON JOUANNE; ENJETI, 1997) e convertidos de pés para metros:

$$L_c = 1,18 \mu H/m \text{ (0,36 } \mu H/p\acute{e}\text{)},$$

$$C_c = 32,81 pF/m \text{ (1,08 pF/p\acute{e})}, \text{ e}$$

$$R_c = 19,69 m\Omega/m \text{ (6 m}\Omega/p\acute{e}\text{)}.$$

O modelo do cabo com esses parâmetros apresenta uma impedância característica de valor $Z_c = 179,74 \Omega$.

A discussão sobre a definição do comprimento do cabo e o número de segmentos o modelo π para a representação do cabo é apresentada nas subseções a seguir.

6.1.3.1. Comprimento do Cabo e Número de Segmentos do Modelo π

Segundo (PERSSON, 1992) uma reflexão completa do pulso no fim do cabo sempre ocorrerá quando a inequação $t_s/t_p < 2$ for verdadeira. Essa inequação decorre da condição em que a subida da tensão nos terminais do motor, ocasionada pela incidência do pulso, que demora o tempo de subida do pulso t_s , não seja interrompida pela incidência do pulso refletido, que demora $2t_p$ (tempo que o pulso refletido demora para ir do motor até o conversor, e após nova reflexão, ir do conversor até o motor). Essa é a condição em que ocorre a reflexão completa.

Utilizando-se a Equação (34) e reescrevendo-se essa inequação, com foco no comprimento do cabo, temos:

$$l_c > \frac{t_s}{2\sqrt{L_c C_c}} \quad (55)$$

Sempre que o comprimento do cabo satisfizer essa inequação haverá uma reflexão completa, e para valores de comprimento menor, poderá ocorrer reflexões parciais.

Utilizando os parâmetros da Tabela 4 e da Tabela 6, o valor a partir do qual o comprimento do cabo passa a implicar em reflexão total do pulso é 6,426 m.

A Figura 46, a seguir, mostra a representação gráfica do pico da sobretensão em razão do comprimento do cabo e das reflexões parciais e completas do pulso nos terminais do motor. São apresentadas as curvas para o modelo simples e para o modelo completo, utilizando-se um único segmento π para a representação do cabo. Para a realização das simulações foram utilizados os parâmetros da Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7.

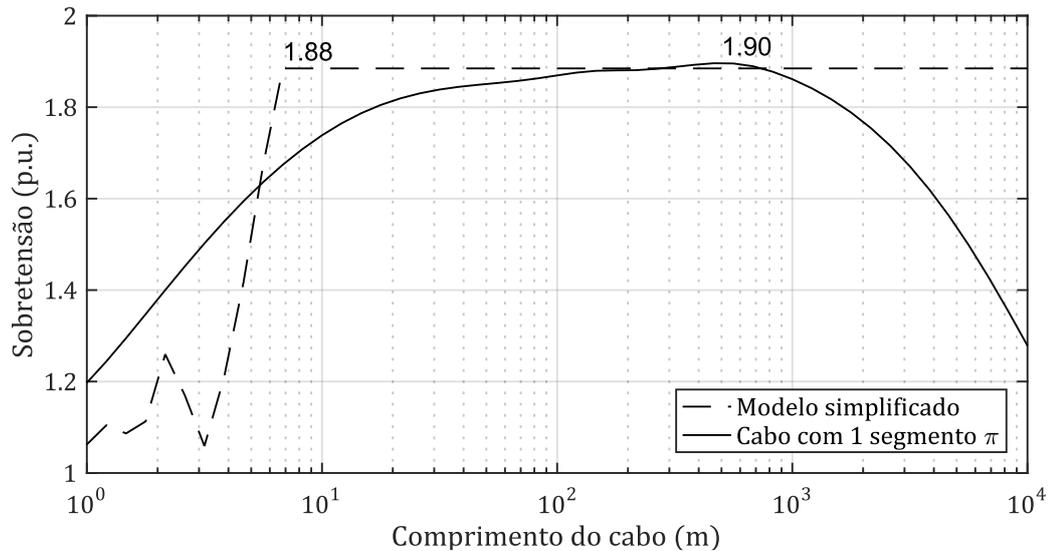


Figura 46 - Valores de pico da sobretensão em razão do comprimento do cabo

Observando a curva do pico da sobretensão do modelo simplificado, o trecho em que o comprimento do cabo é menor do que $6,426\text{ m}$ ocorrem reflexões parciais e, conforme o esperado, a sobretensão não atinge o seu valor máximo. Nesse trecho o comportamento da sobretensão em razão do comprimento do cabo é oscilante, uma vez que a interferência do pulso refletido na tensão dos terminais do motor, antes do fim do processo de subida dessa tensão, pode ser uma interferência construtiva ou destrutiva, dependendo de quantas vezes o pulso foi refletido nos terminais do conversor (em geral o pulso refletido tem polaridade negativa quando foi refletido no conversor por um número ímpar de vezes e tem polaridade positiva quando o número de reflexões é par). Após o comprimento do cabo de $6,426\text{ m}$ o pico da sobretensão se mantém constante em $1,88\text{ p.u.}$.

O comportamento da curva de pico da sobretensão para o modelo completo com um segmento π para representação do cabo tem comportamento um pouco diferente, o aumento do pico da sobretensão é contínuo e íngreme até o comprimento do cabo de 10 m , mantém o crescimento contínuo, mas menos íngreme, até alcançar seu valor de pico de $1,90\text{ p.u.}$ para um comprimento de cabo por volta de 500 m , e a partir daí passa a decrescer.

A fim de entender melhor o comportamento da curva para o modelo completo, a Figura 47 apresenta as curvas para simulações, com o cabo sendo representado por diferentes números de segmentos do modelo π .

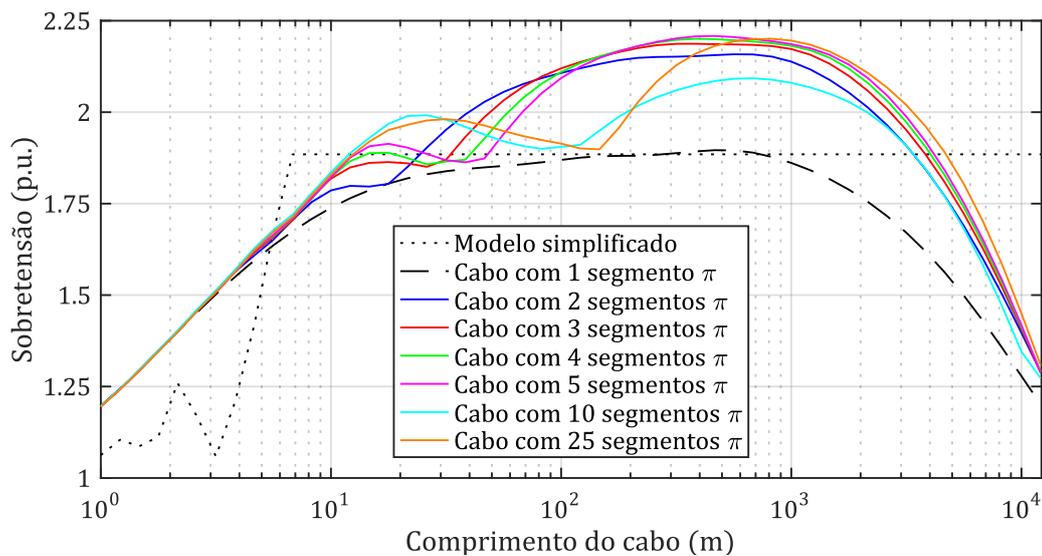


Figura 47 - Valores de pico da sobretensão em razão do comprimento do cabo, para cabos representados por diferentes números de segmentos do modelo π

As curvas para diferentes números de segmentos π têm comportamento semelhante: crescimento contínuo até atingir um máximo local, posterior decrescimento até atingir um mínimo local, novo crescimento até um máximo global e, posterior, decrescimento. Os comprimentos do cabo para o qual acontecem os máximos e mínimos locais variam razoavelmente, já o valor do máximo global é parecido para todas as curvas.

Os mínimos locais se situam bem próximos da curva do cabo representado por um único segmento π , e em valores de comprimento de cabo bem próximo daqueles que satisfazem a Equação (53), que apresenta o valor de número de segmentos π que a boa prática estabelece para a representação de um cabo em relação aos comprimentos de ondas.

A Figura 48 apresenta as formas de onda para essas diferentes representações do cabo.

A menos que seja explicitado o contrário, as simulações contidas nessa seção terão comprimento do cabo de 100 pés ou 30,48 m, utilizado em algumas referências bibliográficas importantes, e de 100 m. Conforme a Figura 46, é possível notar que para o modelo simplificado, tanto 30,48 m como o cabo de 100 m proporcionando reflexão total do pulso no motor. Para o modelo completo, pode-se considerar que para o cabo de 30,48 m a reflexão do pulso no motor é parcial e que 100 m é comprimento suficiente para a ocorrência de reflexão completa do pulso nos terminais do motor.

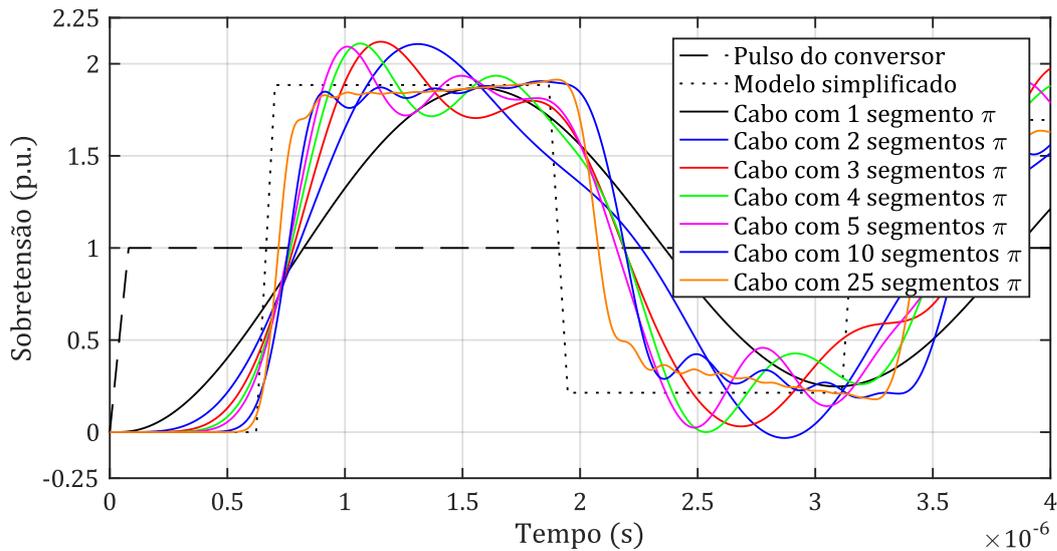


Figura 48 - Formas de onda da sobretensão para cabos representados por diferentes números de segmentos do modelo π , cabos de 100 m

De acordo com a Equação (53), uma boa representação do cabo de 30,48 m deveria ter 8 segmentos π e uma boa representação do cabo de 100 m deveria ter 25 segmentos π .

6.1.4. Comparação Preliminar Entre o Modelo Simplificado e o Modelo Completo de Simulação

Para fins de comparação, serão apresentadas a seguir as formas de onda da sobretensão resultante de simulações utilizando-se o modelo simplificado, em que todas as impedâncias são puramente resistivas, como representado na Figura 41, e utilizando-se o modelo completo, contendo o modelo π de representação do cabo elétrico e o modelo de representação do motor para frequências elevadas proposto por (MOREIRA et al., 2002), como representado na Figura 42.

Na Figura 49 são apresentadas as formas de onda da sobretensão, sem nenhum método de redução, e da sobretensão utilizando-se o método de redução por superposição de pulsos com conversor três níveis (0 , $V_{cc}/2$ e V_{cc}) e intervalo entre os pulsos de $2t_p$, apresentado na subseção 4.5.2.2, a partir de simulações com o modelo simplificado. Na Figura 50 são apresentadas formas de onda análogas, provenientes de simulações com o modelo completo.

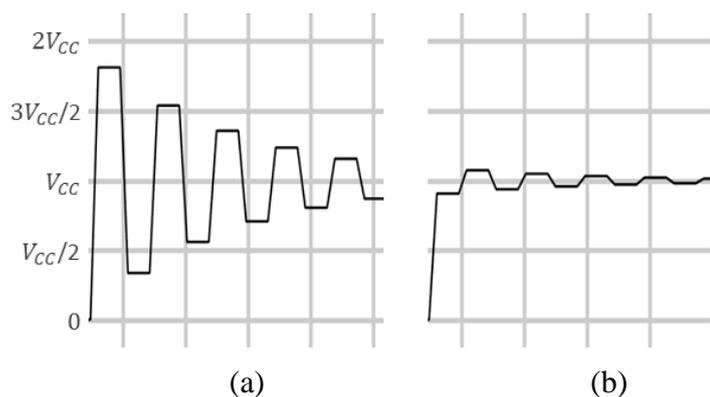


Figura 49 - Curvas de forma de onda da simulação do modelo simplificado

(a) sem nenhum método de redução da sobretensão e (b) superposição de pulsos com conversor três níveis (0 , $V_{cc}/2$ e V_{cc}) e intervalo entre os pulsos de $2t_p$

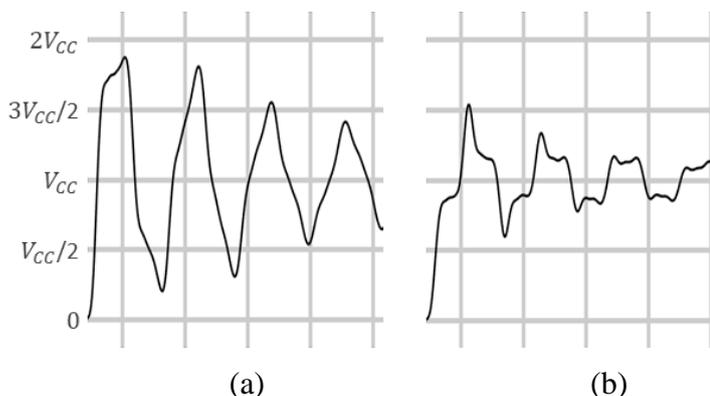


Figura 50 - Curvas de forma de onda da simulação do modelo completo

(a) sem nenhum método de redução da sobretensão e (b) superposição de pulsos com conversor três níveis (0 , $V_{cc}/2$ e V_{cc}) e intervalo entre os pulsos de $2t_p$

É possível notar que as curvas do modelo completo levam em conta as características indutivas e capacitivas do cabo e do motor. Essas curvas se assemelham mais ao fenômeno físico real do que as curvas obtidas pela simulação do modelo simplificado. Para os dois modelos a sobretensão, sem nenhum método de redução, alcançou valor de pico próximo à $1,8V_{cc}$. Pode-se, também, notar que a redução da sobretensão é menos efetiva no modelo completo, Figura 50 (b), sobretensão de $1,53V_{cc}$, do que aquela observada para o modelo simplificado, Figura 49 (b), sobretensão de $1,078V_{cc}$.

A seguir, serão apresentadas as curvas obtidas por dados experimentais publicadas em (NAUMANEN et al., 2010). As curvas foram obtidas por meio de experimentos realizados em um motor acionado por conversor de frequências, conectados por um cabo de 300 metros.

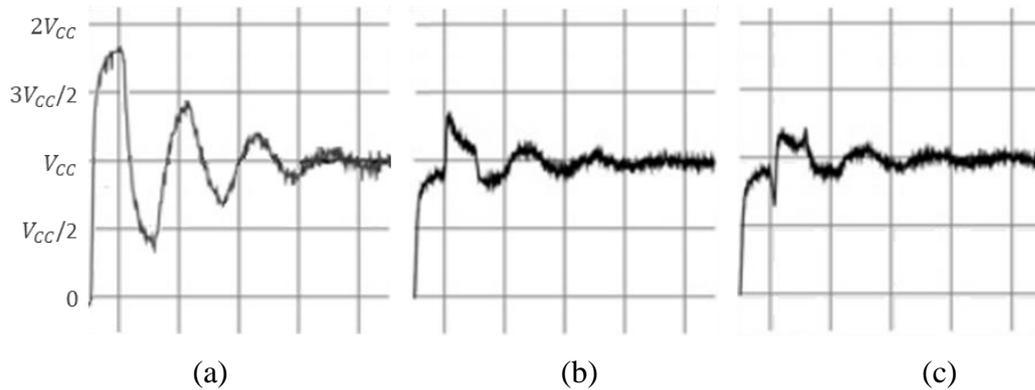


Figura 51 - Curvas de forma de onda com dados experimentais

(a) sem nenhum método de redução da sobretensão (b) superposição de pulsos com conversor três níveis (0 , $V_{cc}/2$ e V_{cc}) e intervalo entre os pulsos de $2t_p$ e (c) superposição de pulsos com conversor três níveis (0 , $V_{cc}/2$ e V_{cc}) e intervalo entre os pulsos de $2,27t_p$

Fonte: Adaptado de (NAUMANEN et al., 2010)

A sobretensão sem nenhum método de redução, Figura 51 (a), alcançou o valor de $0,8V_{cc}$ e a sobretensão utilizando o método de redução por superposição de pulsos com conversor três níveis (0 , $V_{cc}/2$ e V_{cc}) e intervalo entre os pulsos de $2t_p$, Figura 51 (b), alcançou o valor de $1,36V_{cc}$. Nota-se que, apesar dos valores de pico de sobretensão um pouco diferentes, as formas de onda da simulação do modelo completo (Figura 50) e as formas de ondas dos experimentos de (NAUMANEN et al., 2010) são muito semelhantes. Isso reforça a afirmação de que as simulações do modelo completo têm mais semelhanças com o fenômeno físico da sobretensão.

Adicionalmente, da Figura 51 (b) é possível notar que a redução da sobretensão em ambiente experimental, também, não é tão efetiva para o método por superposição de pulsos com conversor três níveis (0 , $V_{cc}/2$ e V_{cc}) e intervalo entre os pulsos de $2t_p$. Isso, também, foi observado por (NAUMANEN et al., 2010), que concluiu que no momento $2t_p$ após o lançamento do primeiro pulso, o pulso refletido que chega nos terminais do conversor está chegando com um frente de onda de forma alterada e ainda em processo de subida, o pico dessa onda só alcançará os terminais do conversor em um momento posterior. Para encontrar o ponto ótimo de redução da sobretensão, o segundo pulso do conversor deve ser lançado em um momento que resulte em uma coincidência do pico do segundo pulso do conversor com o pico da onda que está sendo refletida nos terminais do conversor. Variando esse intervalo entre os dois pulsos do conversor, para esse experimento em específico, foi encontrado o intervalo de tempo ótimo entre os pulsos de $2,27t_p$, resultando em uma sobretensão $1,17V_{cc}$, apresentada na Figura 51 (c).

6.2. Avaliação da Sobretensão

A fim de avaliar a sobretensão nas condições propostas na Seção 5 e com os parâmetros definidos na subseção 6.1, foram realizadas simulações que têm seus resultados apresentados nas Figura 52, Figura 53, Figura 54 e Figura 55. Foram utilizados os parâmetros compilados na Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7, para um motor de 3 *hp* de potência e cabos de 30,48 *m* e 100 *m*, utilizando modelos com 1, 5, 10 e 25 segmentos π para a representação do modelo do cabo, e sem a aplicação de nenhum método para a redução da sobretensão.

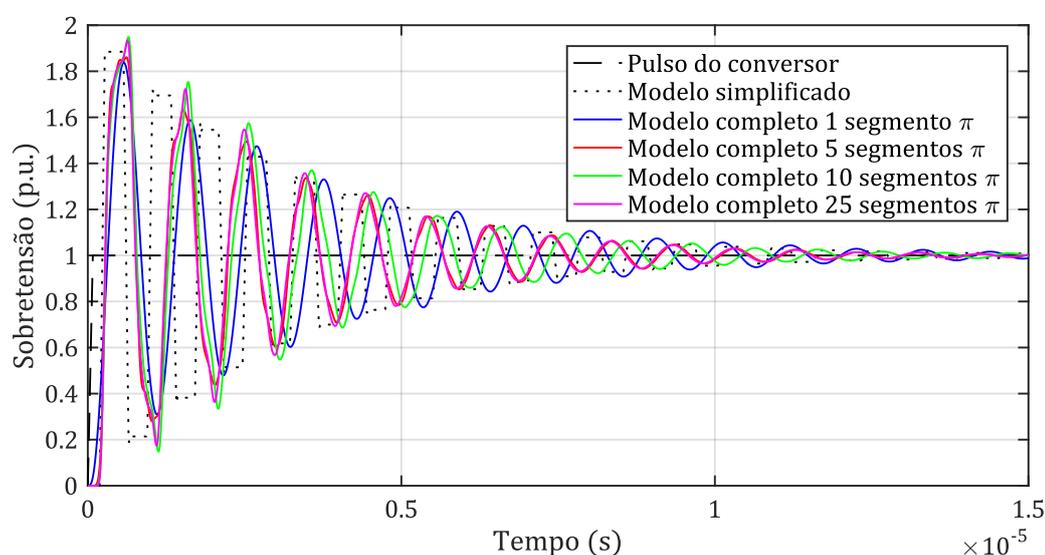


Figura 52 - Resultado de simulação – sobretensão sem nenhum método de redução, cabo de 30,48 *m*

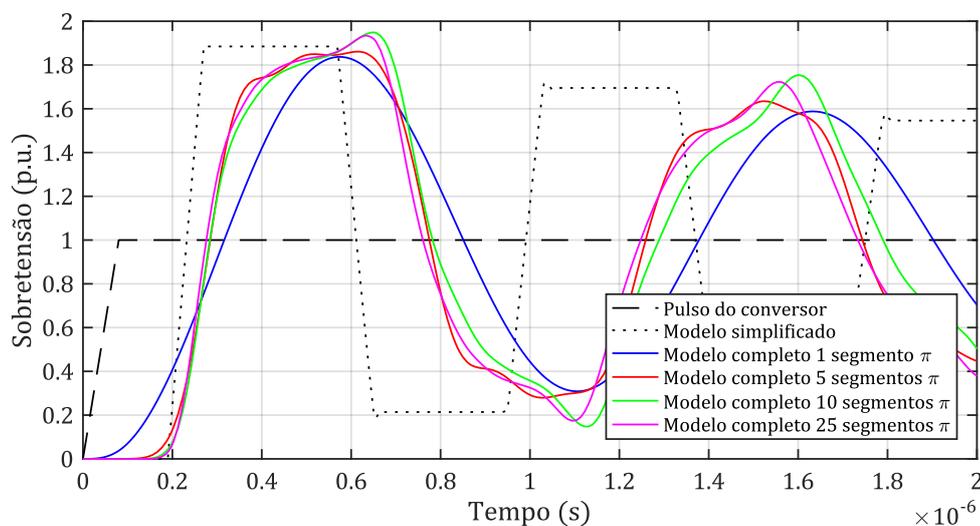


Figura 53 - Resultado de simulação – detalhes da curva de sobretensão sem nenhum método de redução, cabo de 30,48 *m*

Os resultados da simulação com cabo de 30,48 m são curvas de sobretensão que apresentam picos de: 1,885 p.u. para o modelo simplificado, 1,837 p.u. para o modelo completo com cabo representado por 1 segmento π , 1,861 p.u. para o modelo completo com cabo representado por 5 segmentos π , 1,949 p.u. para o modelo completo com cabo representado por 10 segmentos π e 1,934 p.u. para o modelo completo com cabo representado por 25 segmentos π .

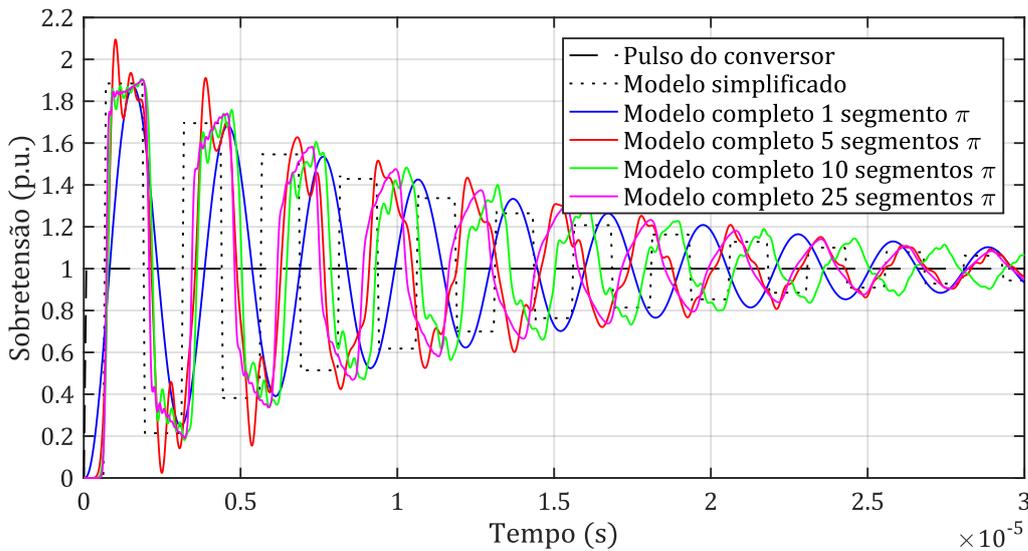


Figura 54 - Resultado de simulação – sobretensão sem nenhum método de redução, cabo de 100 m

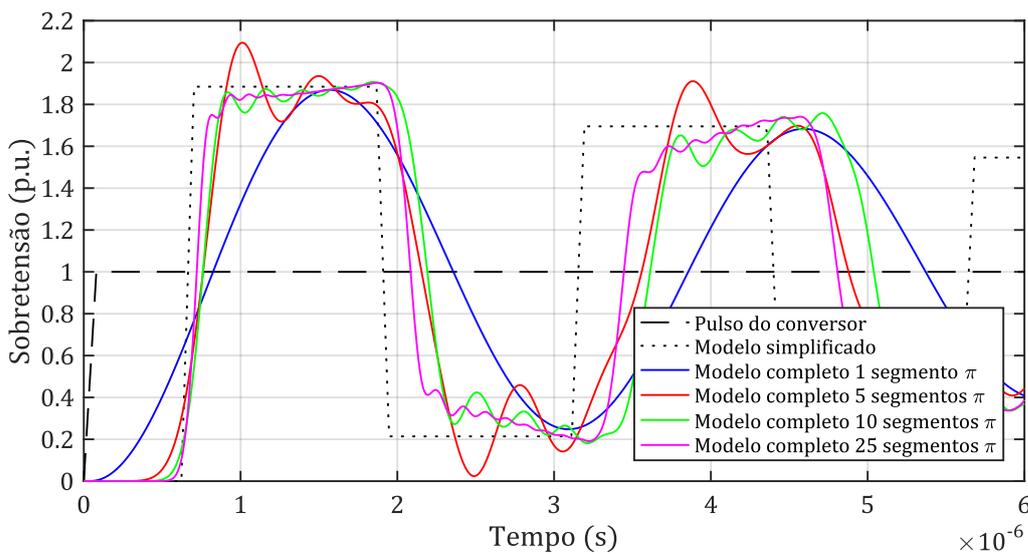


Figura 55 - Resultado de simulação – detalhes da curva de sobretensão sem nenhum método de redução, cabo de 100 m

Os resultados da simulação com cabo de 100 m são curvas de sobretensão que apresentam picos de: 1,885 p.u. para o modelo simplificado, 1,869 p.u. para o modelo completo com cabo representado por 1 segmento π , 2,095 p.u. para o modelo completo com cabo representado por 5 segmentos π , 1,907 p.u. para o modelo completo com cabo representado por 10 segmentos π e 1,903 p.u. para o modelo completo com cabo representado por 25 segmentos π .

Analisando a Figura 53 e a Figura 55 é possível notar que tanto para o cabo de 30,48 m, como para o cabo de 100 m, o modelo completo com o cabo representado por um único segmento π (parâmetros concentrados) apresenta picos de sobretensão bem próximos daqueles obtidos pelo modelo simplificado. Com relação aos cabos representados por diversos segmentos π (parâmetros distribuídos), a Equação (53) preconiza que uma boa representação do cabo de 30,48 m deveria ter 8 segmentos π e uma boa representação do cabo de 100 m deveria ter 25 segmentos π . Tanto a representação do cabo com quantidades de segmentos π abaixo do preconizado, como acima do preconizado, apresentam distorções na forma de onda que geram grandes picos de sobretensão.

Na Seção 8 será proposto um estudo futuro mais detalhado sobre a quantidade ótima de segmentos π para a representação dos cabos. Nessa Seção, serão avaliados os resultados obtidos por simulação para cabos representados por um único segmento π .

A Figura 56 apresenta as curvas de sobretensão com cabos representados por um único segmento π e comprimentos de 30,48 e 100 m, com parâmetros qualitativos de sobressinal (S), tempo de subida (t_{subida}) até o nível da tensão de regime permanente, tempo de ocorrência do pico da sobretensão (t_{pico}), tempo de acomodação (t_{acomod}) dentro da faixa de $\pm 10\%$ da tensão de regime permanente, período da oscilação de um ciclo completo do transitório da sobretensão (T_{osc}) e a frequência dessa oscilação (f_{osc}).

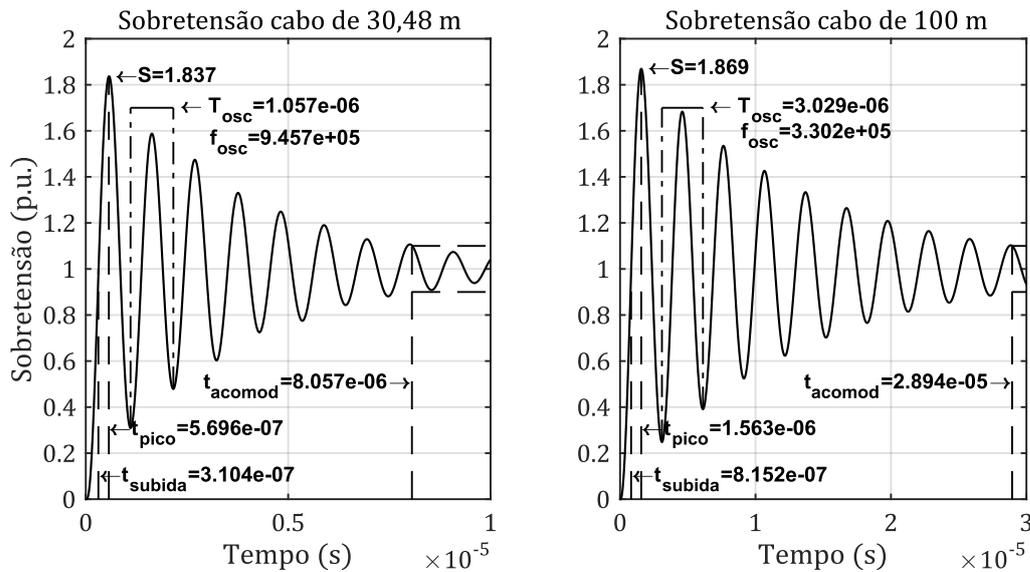


Figura 56 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão sem nenhum método de redução, cabos de 30,48 e 100 m representados por um segmento π

De posse desses parâmetros é possível apontar as seguintes características da sobretensão:

- Os resultados das simulações apresentam picos de sobretensão altos, próximos de 2 p.u. (S). Para o cabo de 30,48 m a sobretensão não atinge o valor máximo, mas chega bem próximo desse máximo, indicando a ocorrência de uma reflexão parcial, próxima do limiar em que ocorreria uma reflexão completa, como por exemplo é vista para o cabo de 100 m;
- A subida da curva de tensão é íngreme e rápida, alcançando a amplitude de tensão regime permanente pela primeira vez em um período de centenas de nanosegundos (t_{subida}) em ambas as simulações realizadas;
- Em ambos os casos o tempo para atingir o valor de pico (t_{pico}) é pouco menos do que o dobro do tempo para atingir pela primeira vez a nível de tensão de regime permanente (t_{subida});
- O período da oscilação da sobretensão (T_{osc}), também, é bem curto, na casa de microssegundos, em ambos os casos. Esse período é o período que o pulso demora para transitar no cabo por quatro vezes ($4t_p$). Calculando o período da oscilação com o auxílio da Equação (34) os valores obtidos são um pouco menores, 759 ns para o cabo de 30,48 m e 2,49 μs para o cabo de 100m. É possível que parte dessa diferença decorra do passo temporal entre pontos calculados na simulação, o passo máximo estabelecido na simulação foi de 100 ns;

- A frequência da oscilação (f_{osc}) observada nas curvas é da ordem de grandeza de centenas de quilohertz, para o cabo de 30,48 m se aproximando muito de um megahertz. Já os valores calculados são: 1,32 MHz para o cabo de 30,48 m e 401,61 kHz para o cabo de 100 m; e
- O tempo para atingir a faixa de acomodação de $\pm 10\%$ é bem curto para o cabo de 30,48 m (8,06 μs) e, relativamente, curto para o cabo de 100 m (28,94 μs). Em ambos os casos esse tempo é bem menor do que a largura definida do pulso que é 50 μs .

Para efeito de comparação, a Figura 57 apresenta os resultados da simulação da sobretensão em um motor de pequeno porte, 3 hp, e um motor de médio porte, 25 hp, utilizando os parâmetros apresentados na Tabela 5.

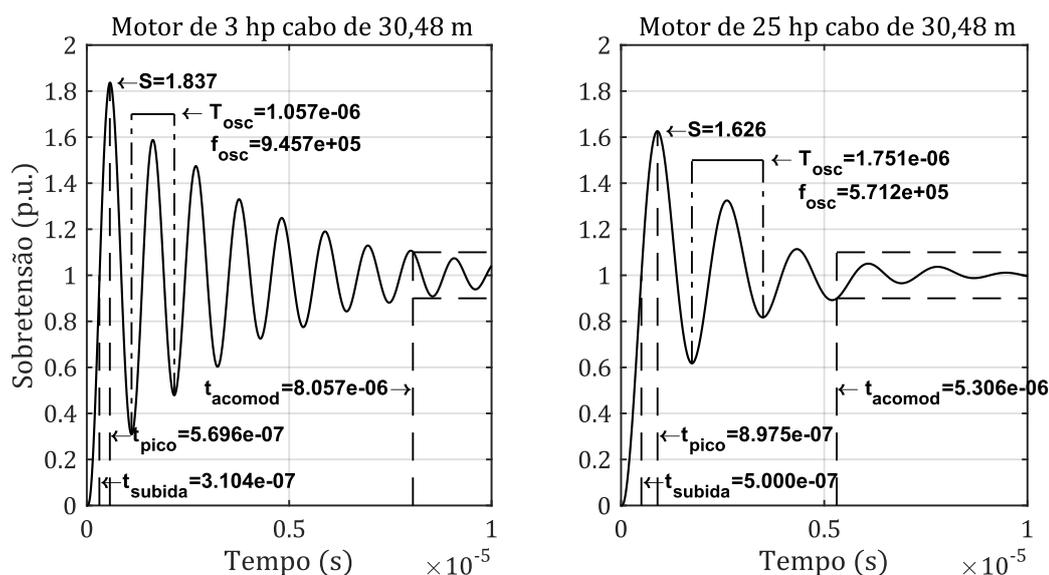


Figura 57 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão de motores de 3 hp e 25 hp, sem nenhum método de redução, com cabo de 30,48 representado por um segmento π

É possível observar que a sobretensão é menos grave no motor de médio porte, que em geral possui uma impedância de entrada menor do que motores de pequeno porte. Nesse caso, para o motor de médio porte, o pico da sobretensão foi 25,2% menor, a frequência de oscilação foi 39,6% menor e o tempo para atingir a faixa de acomodação foi 34,1% menor. A redução da frequência de oscilação, deve-se, em partes, pelo motor de médio porte apresentar capacitâncias mais elevadas do que o motor de pequeno porte.

6.3. Avaliação da Redução da Sobretensão com Filtros Passivos

Para a avaliação da redução da sobretensão com o uso de filtros passivos, serão utilizados o filtro RLC na saída do conversor e o filtro RC na entrada do motor (apresentados na subseção 4.5.1) e propostos por (VON JOUANNE; ENJETI, 1997). Os parâmetros desses filtros são apresentados na Tabela 8. Os demais parâmetros utilizados nas simulações constam na Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7.

Os parâmetros utilizados nos filtros e propostos por (VON JOUANNE; ENJETI, 1997) foram dimensionados para um cabo, com os mesmos parâmetros utilizados neste trabalho, com comprimento de 100 pés, equivalente à 30,48 m. Foram realizadas simulações utilizando os filtros RC e RLC com cabos de 30,48 e 100 m. Os resultados são apresentados na Figura 58.

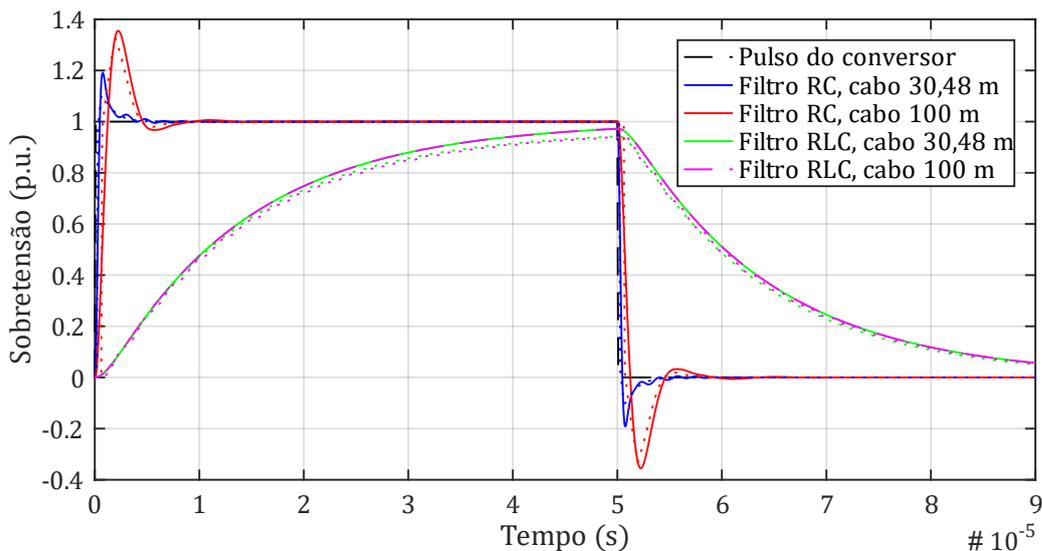


Figura 58 - Resultado de simulação – sobretensão com filtros RC e RLC, cabos de 30,48 e 100 m, linhas contínuas representam os resultados para o modelo completo, linhas pontilhadas representam os resultados para o modelo simplificado

Na Figura 58 são apresentados os resultados para a simulação com o modelo completo com um único segmento π (linhas contínuas) e com o modelo simplificado (linhas pontilhadas). Os resultados para uma mesma simulação do modelo simplificado e do modelo completo são muito próximos, por isso as linhas pontilhadas estão sempre muito próximas das linhas contínuas. Para que fosse possível observar que os resultados para o filtro RLC eram praticamente idênticos, e que, por isso, as curvas do gráfico se sobrepunham, foi utilizada a linha tracejada para a curva do filtro RLC com cabo de 100 m.

Cabe ressaltar que, como o modelo simplificado é dotado de um cabo ideal, para o filtro RLC a tensão no motor não alcança a tensão do pulso em regime permanente, sendo um pouco inferior. O motivo é que, após o transitório da sobretensão, o cabo estabiliza com tensão idêntica nas duas extremidades, e, por isso, a tensão no motor é a tensão do pulso do conversor dividida pelas impedâncias do conjunto conversor-filtro e pela impedância do motor.

O filtro RC foi dimensionado especificamente para o limite de sobretensão de 20% (ou 1,2 p.u.), utilizando-se um cabo de 30,48 m. O resultado da simulação, utilizando um cabo de 30,48 m, é bem próximo do esperado (1,192 p.u.). Para um cabo de 100 m, a sobretensão se torna mais relevante e quase alcança o valor 1,335 p.u.. A Figura 59 apresenta o transitório das curvas das simulações dos filtros RC em mais detalhes, e destaca os seus principais parâmetros de avaliação.

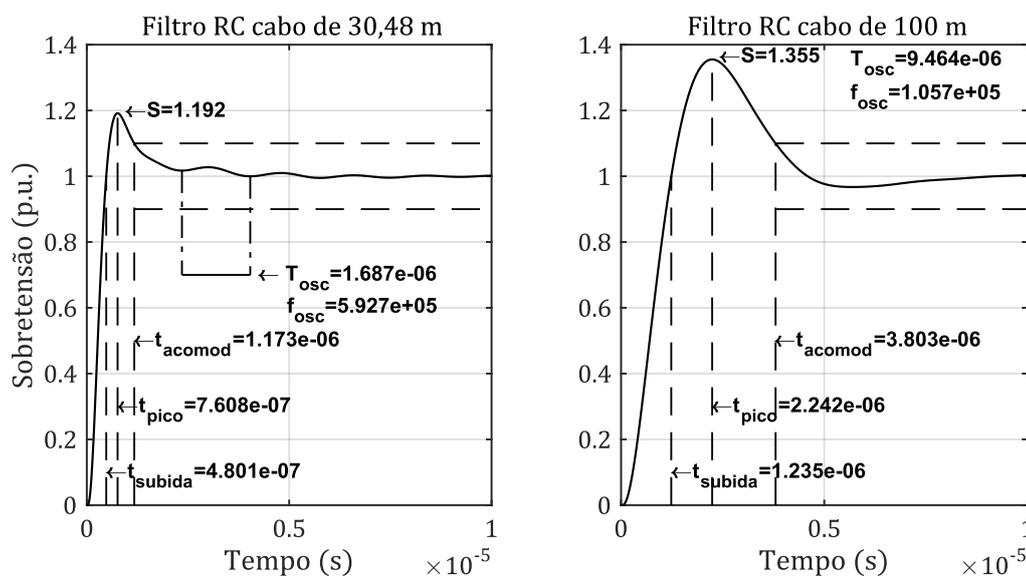


Figura 59 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com filtros RC, cabos de 30,48 e 100 m, representados por um segmento π

Para ambos os casos com o filtro RC, o transitório da sobretensão tem resposta rápida ($0,48 \mu s$ para o cabo de 30,48 m e $1,235 \mu s$ para o cabo de 100 m), existe um sobressinal relevante (1,192 p.u. para o cabo de 30,48 m e 1,355 p.u. para o cabo de 100 m) e as oscilações são pequenas. Nota-se que, em pouco tempo, o sinal se estabiliza na margem de acomodação de $\pm 10\%$ do valor de regime permanente ($1,173 \mu s$ para o cabo de 30,48 m e $3,803 \mu s$ para o cabo de 100 m). A boa velocidade da resposta, com relação ao tempo de subida do pulso ($80 ns$) e o tempo de propagação do pulso no cabo ($189,74 ns$ para o cabo de 30,48 m e $622,50 ns$ para o cabo de 100 m), se dá, em boa parte, em razão da resistência do filtro ter

sido dimensionada para ter valor idêntico à impedância característica do cabo. Portanto, há um casamento de impedâncias que reduz a sobretensão causada pela primeira reflexão do pulso. A pouca oscilação da resposta é proporcionada pelo resistor e, também, pelo capacitor do filtro. Este último, é dimensionado para absorver boa parte da tensão ocasionada pela segunda reflexão do pulso, amortecendo, assim, a oscilação e evitando um transitório mais longo. A frequência da oscilação observada, $592,7\text{ kHz}$ para o cabo de $30,48\text{ m}$ e $105,7\text{ kHz}$ para o cabo 100 m , é menor do que aquela observada na sobretensão, sem qualquer método de redução, $945,7\text{ kHz}$ para o cabo de $30,48\text{ m}$ e $330,2\text{ kHz}$ para o cabo de 100 m , por conta do amortecimento da variação da tensão proporcionada pelo capacitor.

Ajustando o valor da capacitância do filtro para o cabo de comprimento de 100 m , conforme a Equação (35), temos $C_f = 20,05\text{ nF}$. Utilizando-se esse novo parâmetro, temos como resultado da simulação as curvas apresentadas na Figura 60. Ambas apresentam valores abaixo do limite de sobretensão de 20% , utilizado como premissa por (VON JOUANNE; ENJETI, 1997) para a formulação da Equação (35).

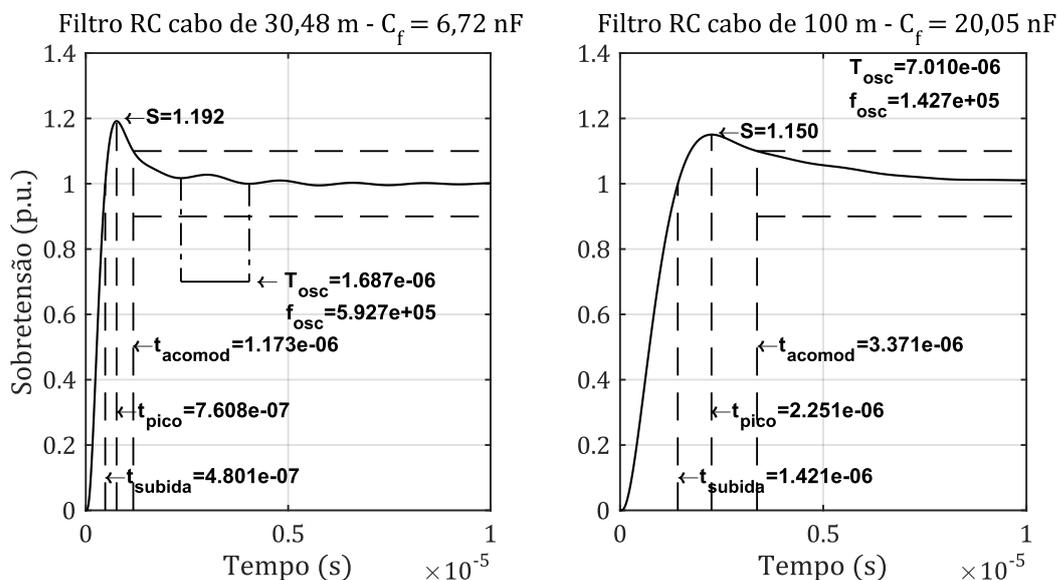


Figura 60 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com filtros RC e C_f redimensionado

O filtro RLC foi dimensionado para apresentar uma resposta superamortecida, reduzindo, assim, o tempo de subida do pulso drasticamente. O filtro atua no pulso antes mesmo deste último alcançar o cabo, dessa forma, o comprimento do cabo não apresenta influência significativa na resposta da tensão no motor. O capacitor do filtro amortece variações bruscas de tensão na entrada do cabo, o indutor do filtro impede variações bruscas de corrente e o resistor faz um casamento de impedâncias com o cabo.

A Figura 61 apresenta a curva de simulação do filtro RLC para o cabo 30,48m, que é, praticamente idêntica, àquela obtida para o cabo de 100 m, com a representação do parâmetro de tempo de acomodação ($33,05 \mu s$).

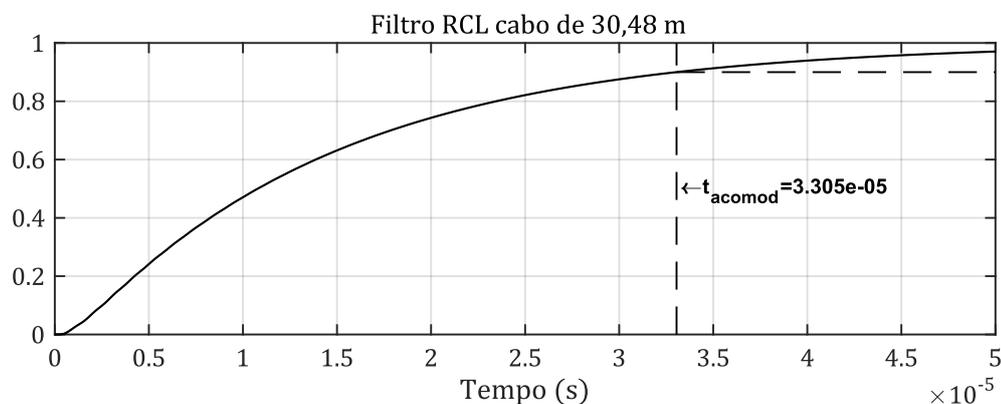


Figura 61 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com filtro RLC, cabo de 30,48m representado por um segmento π

Nota-se que a subida da tensão no motor é bem lenta, nas simulações realizadas, a largura do pulso de $50 \mu s$ sequer foi suficiente para que a tensão alcançasse o valor de regime permanente. Em consequência, não há qualquer sobretensão.

Os resultados de uma simulação com um pulso de largura estendida ($100 \mu s$) são apresentados na Figura 62. Observa-se que a tensão no motor demora $97 \mu s$ para alcançar a tensão de regime permanente (t_{subida}).

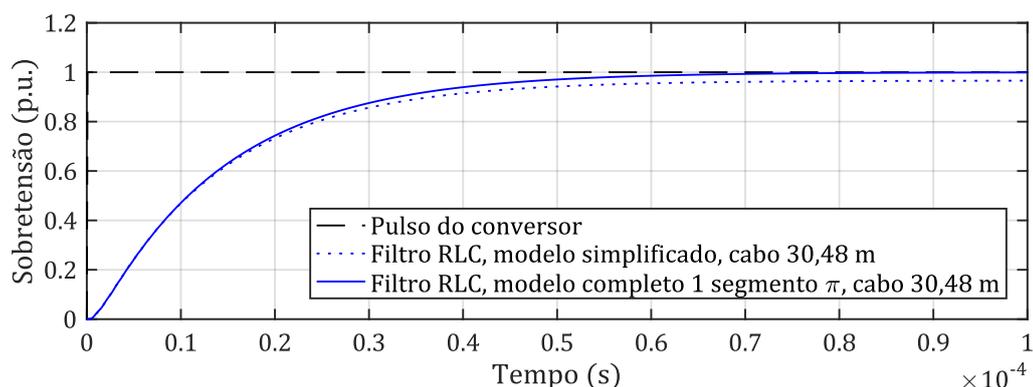


Figura 62 - Resultado de simulação – sobretensão com filtro RLC, largura de pulso estendida, cabo de 30,48m representado por um segmento π

6.4. Avaliação da Redução da Sobretensão por Superposição de Pulsos

As próximas subseções apresentam a avaliação dos métodos de redução da sobretensão que utilizam estratégias de superposição de pulsos. Esses métodos foram previamente apresentados nas subseções 4.5.2.2, 4.5.2.3 e 4.5.2.4.

6.4.1. Avaliação da Sobretensão com Superposição de Pulsos por Conversor de Frequências de Três Níveis

Esse método de redução da sobretensão proposto por (LEE; NAM, 2002) consiste em emitir o primeiro pulso de um conversor de três níveis em nível médio de tensão ($V_{cc}/2$), e realizar a transição de nível médio para nível alto de tensão no momento em que esse primeiro pulso, refletido nos terminais do motor, esteja sendo refletido nos terminais do conversor (intervalo de tempo $2t_p$ após o disparo do primeiro pulso). Nesse momento, superpõem-se o pulso refletido, com polaridade negativa, e o pulso emitido (transição de nível médio, $V_{cc}/2$, para nível alto de tensão V_{cc}) com polaridade positiva, resultando em um pulso de amplitude reduzida e ocasionando uma sobretensão, também, de amplitude reduzida.

A Figura 63 apresenta o resultado das simulações, adotando-se esse método de redução, para arranjos com cabo de 30,48 m e 100 m. A Figura 64 apresenta esses mesmos resultados, explicitando-se os parâmetros qualitativos das curvas de sobretensão.

É possível notar que os resultados para o modelo simplificado são sobretensões com amplitude de pico bem menores do que aquelas observadas para o modelo completo. As tensões de pico são:

- Para o cabo de 30,48 m – 1,05 p. u. para o modelo simplificado, e 1,369 p. u. para o modelo completo com cabo representado por um segmento π ; e
- Para o cabo de 100 m – 1,05 p. u. para o modelo simplificado, e 1,257 p. u. para o modelo completo com cabo representado por um segmento π .

É importante destacar que o período de tempo entre a transição de estados do pulso, $2t_p$, é de aproximadamente 380 ns para o cabo de 30,48 m e 1245 ns para o cabo de 100 m. Esse intervalo de tempo é muito menor do que o intervalo de mudança de estados de um pulso PWM de conversores de frequências convencionais.

No modelo simplificado o pulso refletido tem o mesmo tempo de subida do pulso emitido pelo conversor e mesma forma de onda, só a amplitude é alterada. Dessa forma, no exato momento em que é feita a transição do nível médio para o nível alto do conversor, este segundo pulso se sobrepõe perfeitamente ao pulso que está sendo refletido no conversor. No modelo completo, com o efeito da capacitância e indutância do cabo e do motor, o pulso refletido tem forma de onda diferente do pulso emitido e os tempos de subida, também, divergem. Dessa forma, o pico do pulso refletido não coincide com o pico do segundo pulso emitido, portanto, essa superposição de pulsos não resulta em um pulso com amplitude muito reduzida. Portanto, considera-se que o melhor intervalo de tempo entre os dois disparos de pulso do conversor não seja necessariamente $2t_p$ e, sim, um intervalo de tempo que resulte na coincidência temporal do pico de tensão do pulso refletido e do segundo pulso emitido pelo conversor.

Comparando-se os resultados obtidos pela aplicação desse método, com os resultados obtidos sem qualquer método de redução, é possível notar que:

- A sobretensão teve seu pico reduzido de forma considerável, de 1,837 para 1,369 *p.u.* para o cabo de 30,48 *m*; e de 1,869 para 1,257 *p.u.* para o cabo de 100 *m*;
- O tempo de acomodação, também, foi reduzido, de 8,057 para 5,584 μs para o cabo de 30,48 *m*; e de 28,94 para 13,02 μs para o cabo de 100 *m*;
- Por se tratar de um método que adota a estratégia de subida do pulso em dois estágios, com intervalo definido entre a transição desses estágios, o processo de subida se torna mais lento, conseqüentemente, tanto os tempos de subida como os tempos de ocorrência da tensão de pico são maiores;
- Tempo de subida de 310,4 para 522,2 *ns* para o cabo de 30,48 *m*; e de 815 para 1534 *ns* para o cabo de 100 *m*;
- Momento da ocorrência do pico da sobretensão, de 569,6 para 780,5 *ns* para o cabo de 30,48 *m*; e de 1563 para 2283 *ns* para o cabo de 100 *m*;
- Os valores do período de oscilação e da frequência de oscilação do transitório da sobretensão são praticamente idênticos, não havendo alteração relevante;

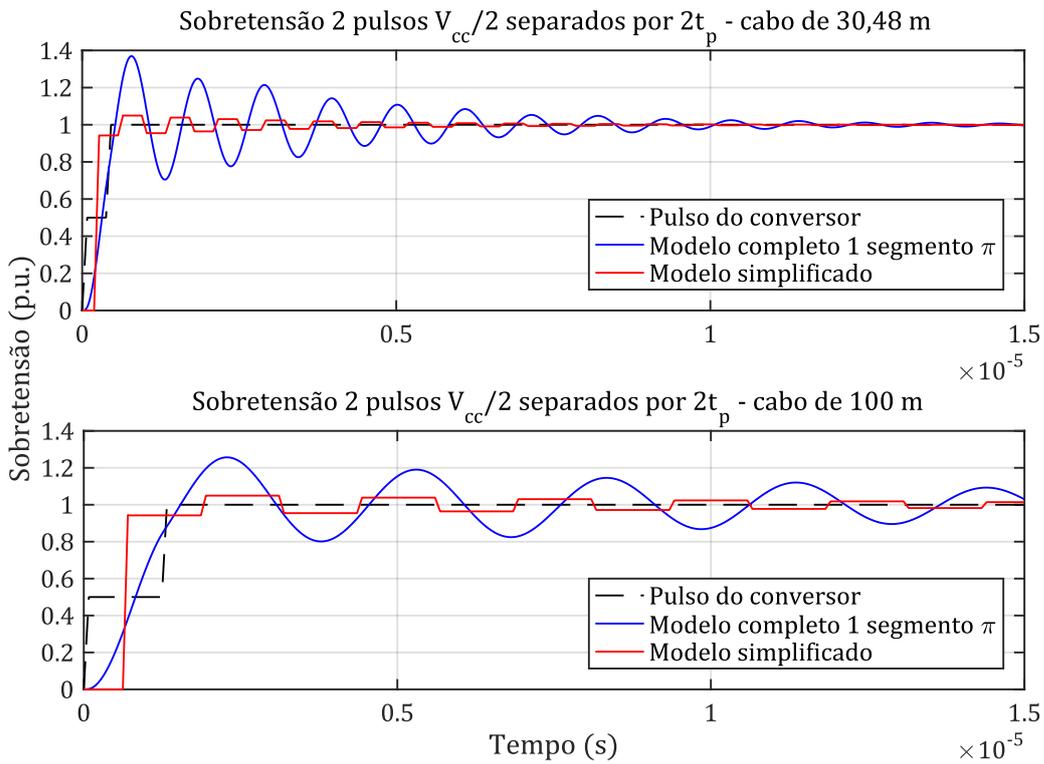


Figura 63 - Resultado de simulação –sobretensão com superposição de pulsos por conversor de três níveis, cabos de 30,48 e 100 m representados por um segmento π

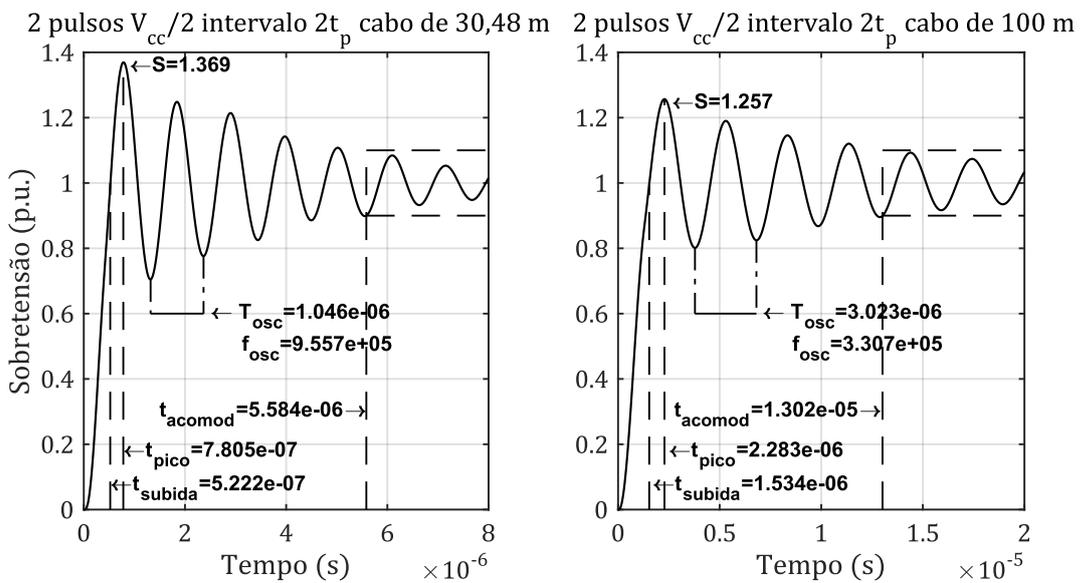


Figura 64 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com superposição de pulsos por conversor de três níveis, cabos de 30,48 e 100 m representados por um segmento π

6.4.2. Avaliação da Sobretensão com Superposição de Pulsos com Conversor de Frequências de Três Níveis, com Nível Intermediário de Tensão Ajustado

Esse método proposto por (LEE, 2006) visa a completa supressão da sobretensão e se assemelha muito ao método apresentado na subseção anterior, porém, considera-se como premissa, que o primeiro estágio de tensão do conversor de três níveis não assume o valor igual a metade da amplitude da tensão do conversor e, sim, um valor ajustado (V_{cc_interm}), de forma que:

- Quando esse primeiro estágio do pulso (V_{cc_interm}) for refletido no motor, a sobretensão seja idêntica ao valor da tensão em regime permanente; e
- Quando esse pulso refletido no motor for novamente refletido no conversor, o segundo estágio do pulso seja emitido ($V_{cc} - V_{cc_interm}$), e esses dois pulsos se anulem.

Utilizando os parâmetros propostos para as simulações na subseção 6.1 e a Equação (48), o valor calculado dessa tensão seria $V_{cc_interm} = 0,5301 p. u.$.

A Figura 65 apresenta o resultado das simulações adotando esse método de redução para arranjos com cabo de 30,48 e 100 m. A Figura 66 apresenta esses mesmos resultados, explicitando os parâmetros qualitativos das curvas de sobretensão.

Os resultados para o modelo simplificado corroboram com aquilo que é proposto no método, supressão completa da sobretensão e das reflexões de pulso no cabo que geram a oscilação da tensão no decorrer do transitório da sobretensão. Entretanto, os resultados da simulação utilizando o modelo simplificado, ainda, apresentam sobretensão: o método consegue reduzir a amplitude da sobretensão, mas não consegue suprimi-la por completo.

Conforme discutido a respeito do método anterior na subseção 6.4.1, é possível que, em razão dos efeitos capacitivos e indutivos do cabo e do motor, que não são levados em conta nas premissas do método, tanto o intervalo de tempo entre os disparos dos pulsos emitidos pelo conversor, como a amplitude do nível intermediário ajustado do pulso, precisem ser redimensionados, a fim de otimizar a redução da amplitude da sobretensão.

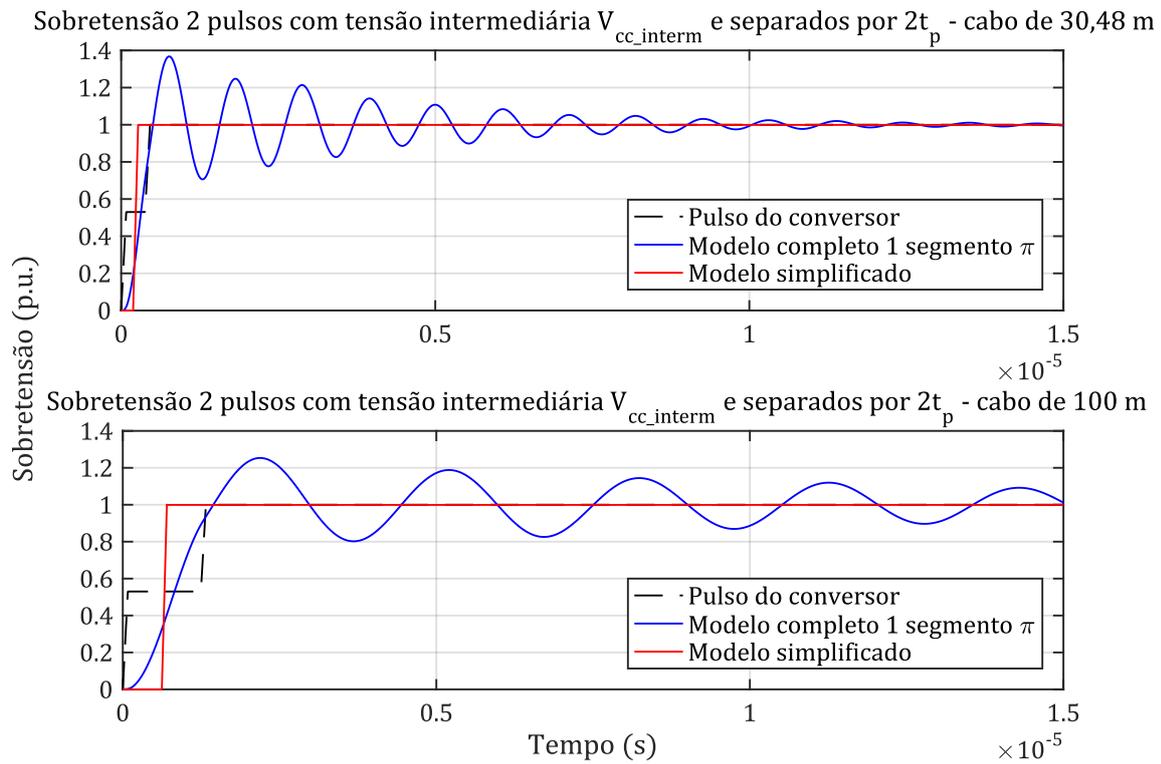


Figura 65 - Resultado de simulação –sobretensão com superposição de pulsos por conversor de três níveis com nível intermediário ajustado, cabos de 30,48 e 100 m representados por um segmento π

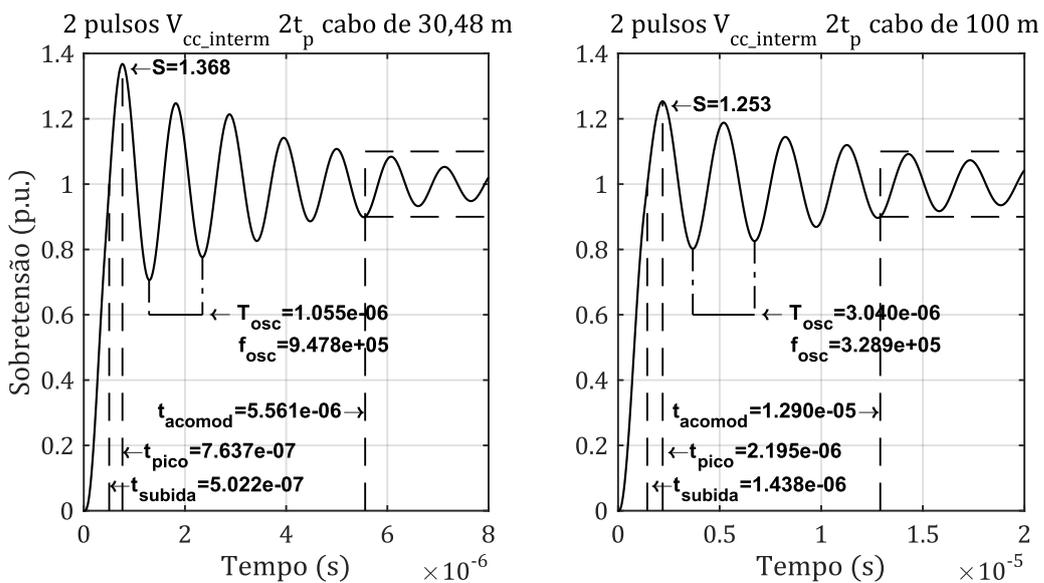


Figura 66 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com superposição de pulsos por conversor de três níveis com nível intermediário ajustado, cabos de 30,48 e 100 m representados por um segmento π

Comparando os resultados obtidos pela aplicação desse método com a sobretensão sem qualquer método de redução, é possível notar que:

- A sobretensão teve seu pico reduzido de forma considerável, de 1,837 para 1,368 *p.u.* para o cabo de 30,48 *m*; e de 1,869 para 1,253 *p.u.* para o cabo de 100 *m*;
- O tempo de acomodação, também, foi reduzido, de 8,057 para 5,561 μs para o cabo de 30,48 *m*; e de 28,94 μs para 12,90 μs para o cabo de 100 *m*;
- Novamente, por se tratar de um método que adota a estratégia de subida do pulso em dois estágios com intervalo definido entre a transição desses estágios, o processo de subida se torna mais lento e os tempos de subida e os tempos de ocorrência da tensão de pico se tornam maiores;
- Tempo de subida de 310,4 para 502,2 *ns* para o cabo de 30,48 *m*; e de 815 para 1438 *ns* para o cabo de 100 *m*;
- Momento da ocorrência do pico da sobretensão, de 569,6 para 763,7 *ns* para o cabo de 30,48 *m*; e de 1563 para 2195 *ns* para o cabo de 100 *m*;
- Os valores do período de oscilação e da frequência de oscilação do transitório da sobretensão são praticamente idênticos, não havendo alteração relevante;

6.4.3. Avaliação da Sobretensão com Superposição de Pulsos com Conversores de Frequências em Paralelo

Proposto por (KORHONEN et al., 2010) esse método consiste em utilizar conversores de frequências de pulsos de dois níveis em paralelo, com disparo de pulsos em momentos distintos. Os conversores são conectados ao motor por cabos idênticos de mesmo comprimento.

Quando o número de conversores utilizados for par, metade dos conversores devem disparar os pulsos em $t = 0$ e a outra metade deve disparar em $t = 2t_p$. Quando o número de conversores utilizados for ímpar, um dos conversores deve disparar o pulso em $t = 0$, metade dos conversores restantes devem disparar em $t = t_p$ e a outra metade deve disparar em $t = 2t_p$.

As Figura 67 até a Figura 74 apresentam os resultados das simulações realizadas para as configurações com 2, 3, 4 e 5 conversores em paralelo, utilizando-se cabos de 30,48 *m* e 100 *m*.

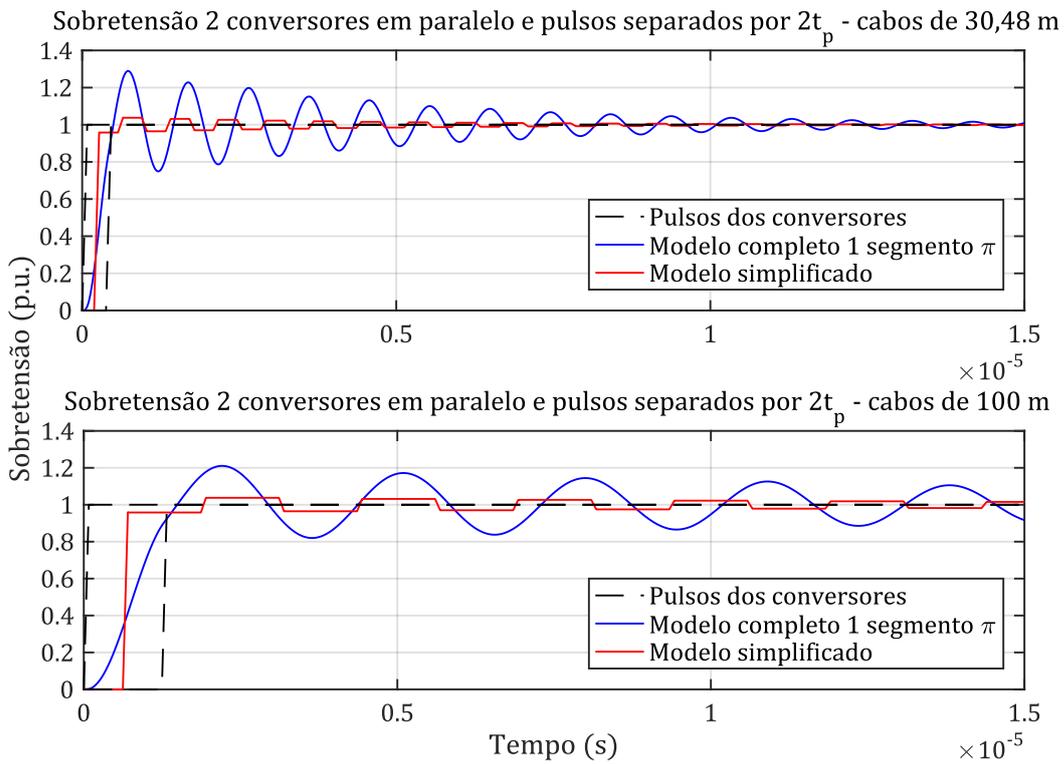


Figura 67 - Resultado de simulação – sobretensão com dois conversores em paralelo

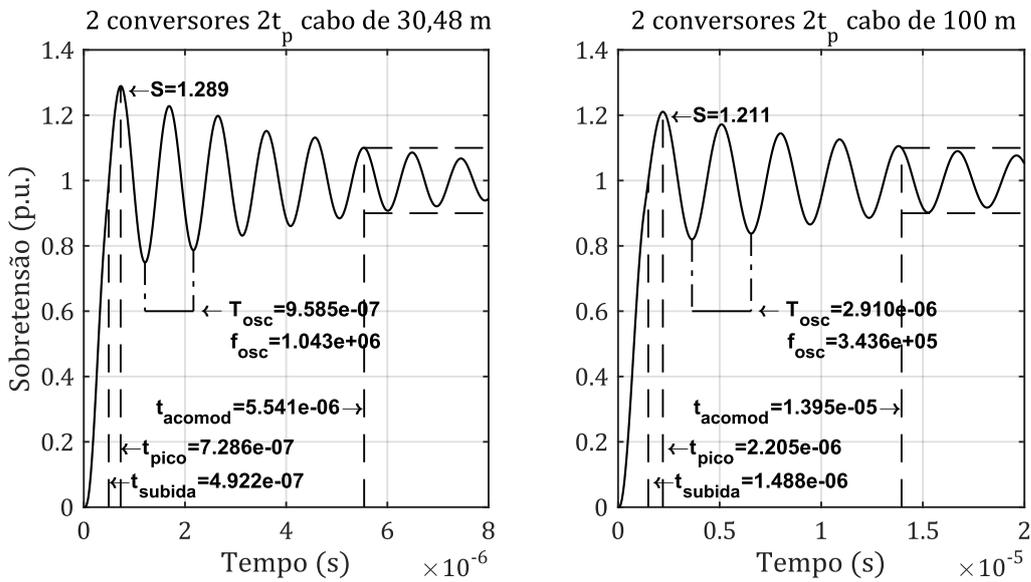


Figura 68 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com dois conversores em paralelo, cabos representados por um segmento π

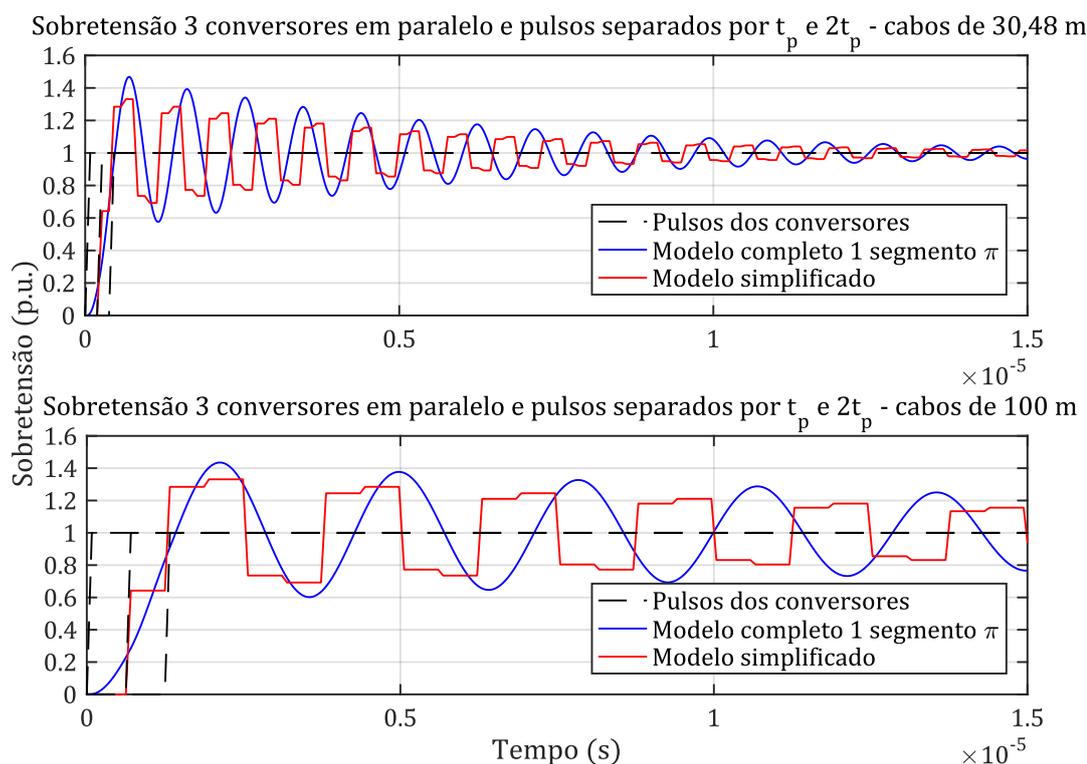


Figura 69 - Resultado de simulação –sobretensão com três conversores em paralelo

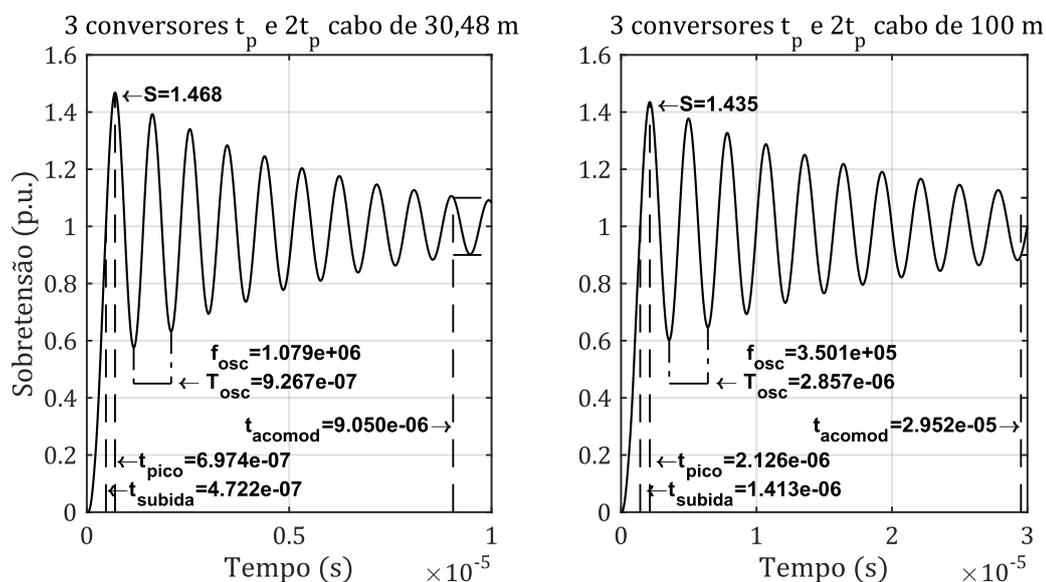


Figura 70 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com três conversores em paralelo, cabos representados por um segmento π

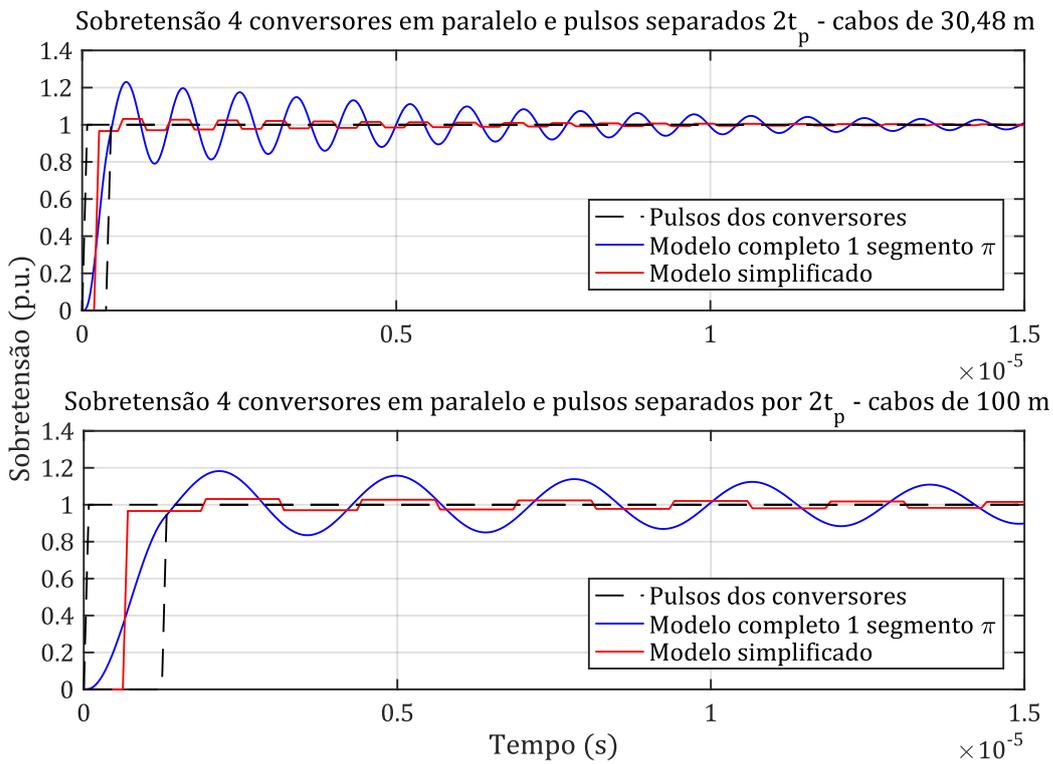


Figura 71 - Resultado de simulação – sobretensão com quatro conversores em paralelo

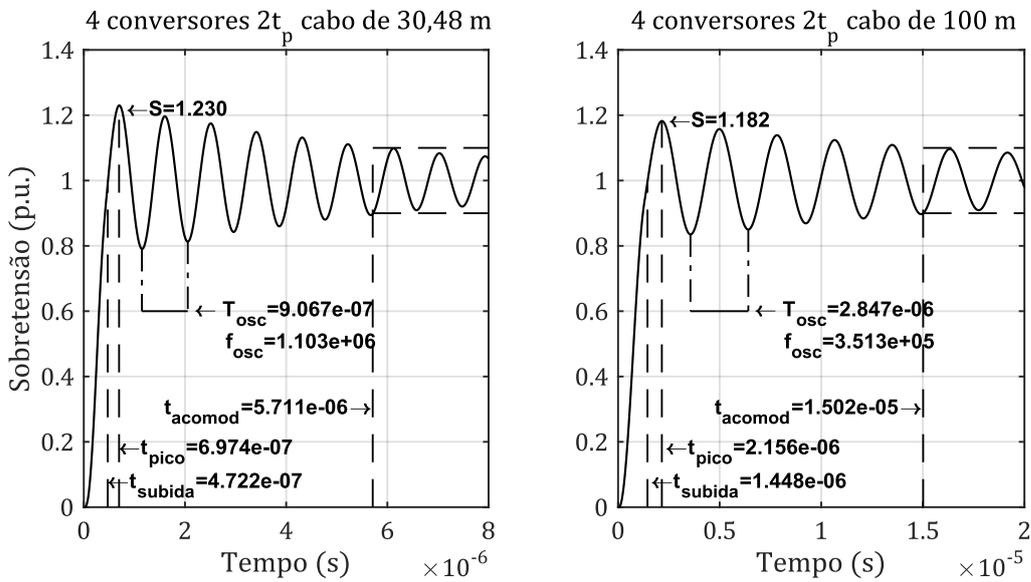


Figura 72 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com quatro conversores em paralelo, cabos representados por um segmento π

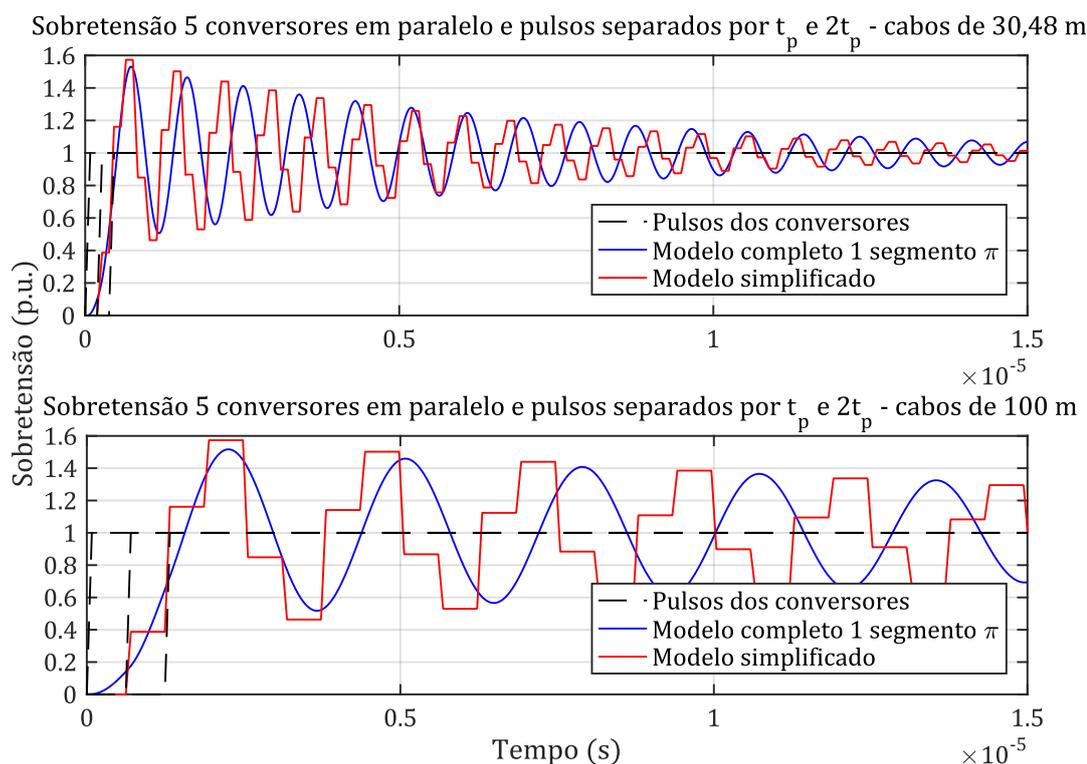


Figura 73 - Resultado de simulação – sobretensão com cinco conversores em paralelo

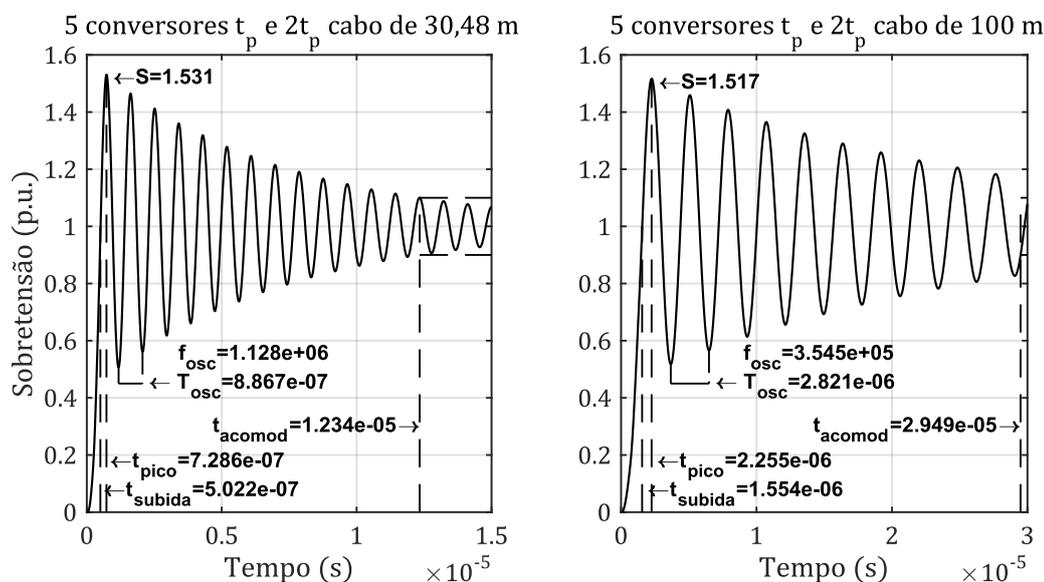


Figura 74 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com cinco conversores em paralelo, cabos representados por um segmento π

Avaliando comparativamente os resultados das simulações dos arranjos com diferentes números de conversores em paralelo, apesar do espaço amostral pequeno, nota-se:

- Para números pares de conversores, o aumento do número de conversores implica em mais impedâncias de cabos em paralelo com o motor, menor coeficiente de reflexão e, conseqüentemente, menor pico de sobretensão;
- Essa mesma lógica não foi percebida para os arranjos com número ímpar de conversores, observou-se que com o aumento de 3 para 5 conversores a curva de sobretensão subiu mais rapidamente após a chegada no motor dos pulsos disparados nos instantes t_p e $2t_p$, resultando em pico de sobretensão mais elevado; e
- A oscilação da sobretensão tem amplitude menor nos arranjos com números pares de conversores, por isso, a sobretensão se acomoda mais rapidamente dentro da faixa de $\pm 10\%$ da amplitude da tensão em regime permanente.

Comparando-se os resultados apresentados nesta subseção, provenientes de diferentes arranjos de conversores em paralelo, com a sobretensão sem qualquer método de redução, é possível destacar que:

- A sobretensão teve redução em todos os arranjos, variando de 1,182 *p.u.* a 1,531 *p.u.*, respectivamente para os arranjos com 4 conversores e cabo de 100 *m* e com 5 conversores e cabo de 30,48 *m*;
- O tempo de acomodação variou de 5,541 μs até 29,52 μs , sendo que somente os arranjos com número ímpar de conversores tiveram tempo de acomodação mais longo do que quando não é aplicado nenhum método de redução da sobretensão;
- Novamente, por se tratar de um método que adota a estratégia de subida do pulso em dois ou três estágios, com intervalo definido entre a transição desses estágios, o processo de subida se torna mais lento e os tempos de subida e os tempos de ocorrência da tensão de pico se tornam maiores; e
- As frequências de oscilação do transitório da sobretensão são próximas, mas um pouco maiores do que aquela obtida quando não se aplica nenhum método de redução da sobretensão.

6.5. Avaliação Comparativa Preliminar

As comparações apresentadas nesta subseção são denominadas como preliminares por não terem sido aplicados aos métodos de redução da sobretensão qualquer tipo de otimização

de seus parâmetros. Esses métodos foram utilizados conforme são descritos nas referências bibliográficas. Na subseção 6.6 serão exploradas algumas otimizações nos métodos e seus parâmetros, e será apresentada nova avaliação comparativa na subseção 6.7.

6.5.1. Avaliação Preliminar dos Métodos de Redução da Sobretensão

Uma comparação gráfica preliminar do valor de pico da sobretensão resultante da aplicação dos métodos de redução analisados até aqui, em razão do comprimento do cabo, é apresentada na Figura 75.

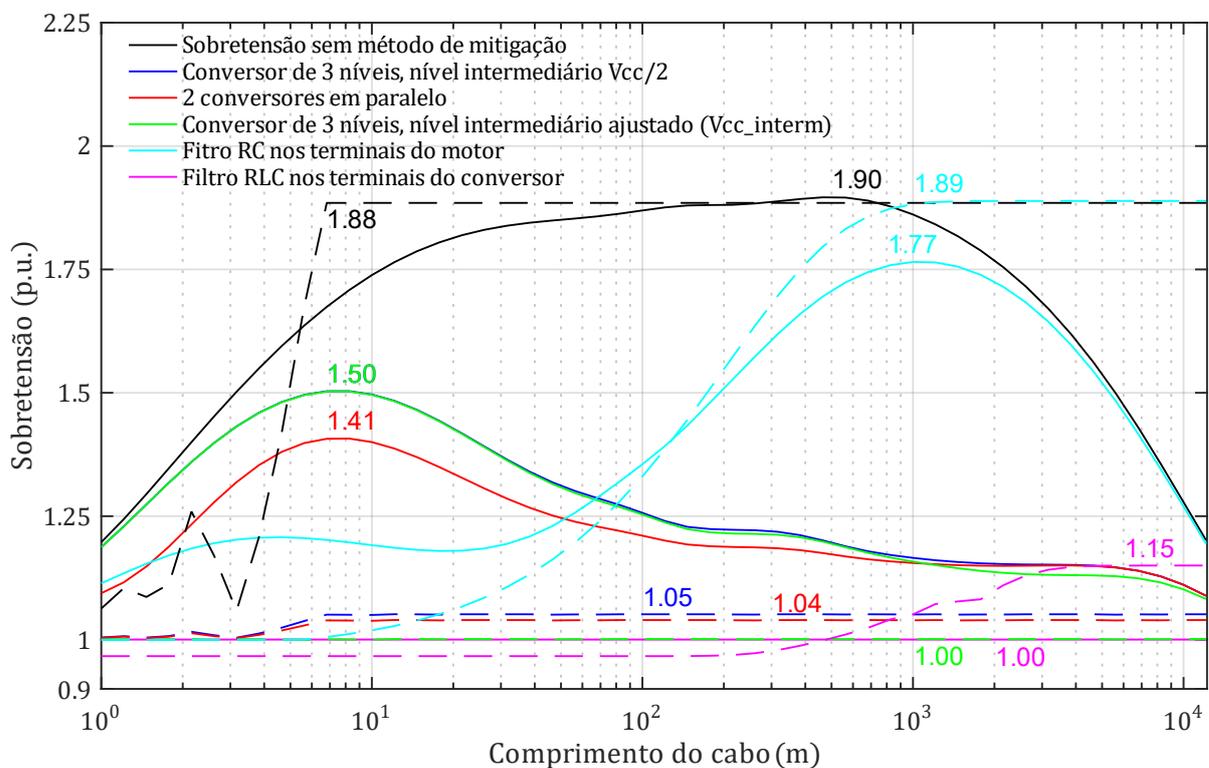


Figura 75 - Resultado de simulação – comparação do pico da sobretensão, utilizando diferentes métodos de redução, em razão do comprimento do cabo. Linhas contínuas representam os resultados para o modelo completo, com o cabo sendo representado por um único segmento π , e as linhas tracejadas representam os resultados para o modelo simplificado

Para a realização das simulações que deram origem à Figura 75 foram utilizados os parâmetros da Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8.

É possível inferir que a eficácia dos métodos, que fazem uso da estratégia de superposição de pulsos, é maior na faixa de comprimento de cabos em que ocorre uma reflexão completa dos pulsos no motor. De forma oposta, o desempenho do filtro RC no motor é melhor na faixa em que a reflexão ainda não é completa, isso porque o seu capacitor foi dimensionado para essa faixa de comprimento de cabo. Para outros comprimentos de cabo, o capacitor precisa ser redimensionado para que o filtro apresente bom desempenho. O filtro RLC no conversor apresenta bom desempenho em toda a faixa de comprimentos de cabo analisada.

6.5.2. Avaliação Comparativa Preliminar dos Parâmetros Obtidos nas Simulações

A Tabela 10 e a Tabela 11 compilam os parâmetros extraídos dos resultados das simulações apresentadas nas subseções 6.2, 6.3 e 6.4, respectivamente para os comprimentos de cabo de 30,48 m e 100 m.

Tabela 10 - Compilação dos parâmetros obtidos por simulação para o cabo de 30,48 m

Método	Pico da sobretensão (p. u.)	Tempo de acomodação (μs)	Tempo de subida (ns)	Tempo de pico (ns)	Frequência de oscilação (kHz)	Período de oscilação (μs)
Sem redução	1,837	8,057	310,4	569,6	945,7	1,057
Filtro RC no motor	1,192	<u>1,173</u>	<u>480,1</u>	<u>760,8</u>	<u>592,7</u>	<u>1,687</u>
Filtro RLC no conv.	<u>1,000</u>	33,050	97000,0	-	-	-
Conv. 3 níveis $V_{cc}/2$	1,369	5,584	522,2	780,5	955,7	1,046
Conv. 3 níveis V_{cc_interm}	1,368	5,561	502,2	763,7	<u>947,8</u>	<u>1,055</u>
2 conv. em paralelo	1,289	<u>5,541</u>	492,2	728,6	1043,0	0,956
3 conv. em paralelo	1,468	9,050	<u>472,2</u>	<u>697,4</u>	1079,0	0,927
4 conv. em paralelo	<u>1,230</u>	5,711	<u>472,2</u>	<u>697,4</u>	1103,0	0,907
5 conv. em paralelo	1,531	12,340	502,2	728,6	1128,0	0,887

Tabela 11 - Compilação dos parâmetros obtidos por simulação para o cabo de 100 m

Método	Pico da sobretensão (<i>p. u.</i>)	Tempo de acomodação (μs)	Tempo de subida (<i>ns</i>)	Tempo de pico (<i>ns</i>)	Frequência de oscilação (<i>kHz</i>)	Período de oscilação (μs)
Sem redução	1,869	28,94	815	1563	330,2	3,029
Filtro RC no motor	1,355	3,80	<u>1235</u>	<u>2242</u>	<u>105,7</u>	<u>9,464</u>
Filtro RC (C_f ajustado)	1,150	<u>3,37</u>	1421	2251	142,7	7,010
Filtro RLC no conv.	<u>1,000</u>	33,05	-	-	-	-
Conv. 3 níveis $V_{cc}/2$	1,257	13,02	1534	2283	330,7	3,023
Conv. 3 níveis V_{cc_interm}	1,253	<u>12,90</u>	1438	2195	<u>328,9</u>	<u>3,040</u>
2 conv. em paralelo	1,211	13,95	1488	2205	343,6	2,910
3 conv. em paralelo	1,435	29,52	<u>1413</u>	<u>2126</u>	350,1	2,857
4 conv. em paralelo	<u>1,182</u>	15,02	1448	2156	351,3	2,847
5 conv. em paralelo	1,517	29,49	1554	2255	354,5	2,821

As tabelas foram divididas em 3 seções, com as divisões representadas pelas linhas duplas na horizontal, a primeira para os resultados da sobretensão sem a aplicação de nenhum método de redução, a segunda para os resultados considerando-se filtros passivos, e a terceira para os resultados aplicando-se os métodos de superposição de pulsos. Os melhores resultados obtidos em cada seção, para cada um dos parâmetros, foram sublinhados para destaque.

Os menores valores de sobretensão foram obtidos com a aplicação do filtro RLC, que suprime completamente a sobretensão. Em contrapartida, a subida da curva de tensão é extremamente lenta, a tensão não chega à 1 *p. u.* no período de tempo da largura do pulso, que é 50 μs .

O filtro RC apresenta excelentes resultados, desde que ajustado para o comprimento do cabo. O capacitor precisa ser reajustado sempre que o comprimento do cabo sofrer alteração considerável.

Para os métodos de superposição de pulsos a menor sobretensão obtida foi para o arranjo de 4 conversores em paralelo. Esse arranjo, também, apresenta bons tempos de subida e de acomodação. No entanto, ressalta-se que esse é um arranjo complexo, que demanda 4 conversores e 4 cabos idênticos.

Os dois métodos que utilizam de conversores de pulsos de três níveis são bem equilibrados, apresentando bons resultados de redução da sobretensão, de tempos de subida e

acomodação, e têm arranjos menos complexos do que aqueles que utilizam conversores em paralelo.

6.6. Otimização dos Métodos de Redução da Sobretensão e dos seus Parâmetros

6.6.1. Otimização do Intervalo de Tempo Entre o Disparo dos Pulsos

Na subseção 6.4 foi observado que os métodos de redução da sobretensão por superposição de pulsos apresentam desempenho melhor nas simulações com o modelo simplificado - que é uma representação teórica e simplificada para o transitório da sobretensão - do que com o modelo completo - que é uma representação mais próxima do fenômeno real da sobretensão. Aparentemente a capacitância e a indutância do cabo, levados em conta no modelo completo, influenciam na forma de onda dos pulsos refletidos e impactam nesse desempenho. A alteração da forma de onda e o deslocamento do seu pico faz com que o sincronismo proposto entre os disparos dos pulsos, que em teoria deveria ser $2t_p$, não seja a condição ótima de superposição do pulso refletido com o segundo pulso emitido pelo conversor.

(DE PAULA DOS SANTOS; SARTORI, 2020) apresenta uma breve análise desse tema. Uma análise preliminar, para um cabo de 100 m é apresentada na Figura 76.

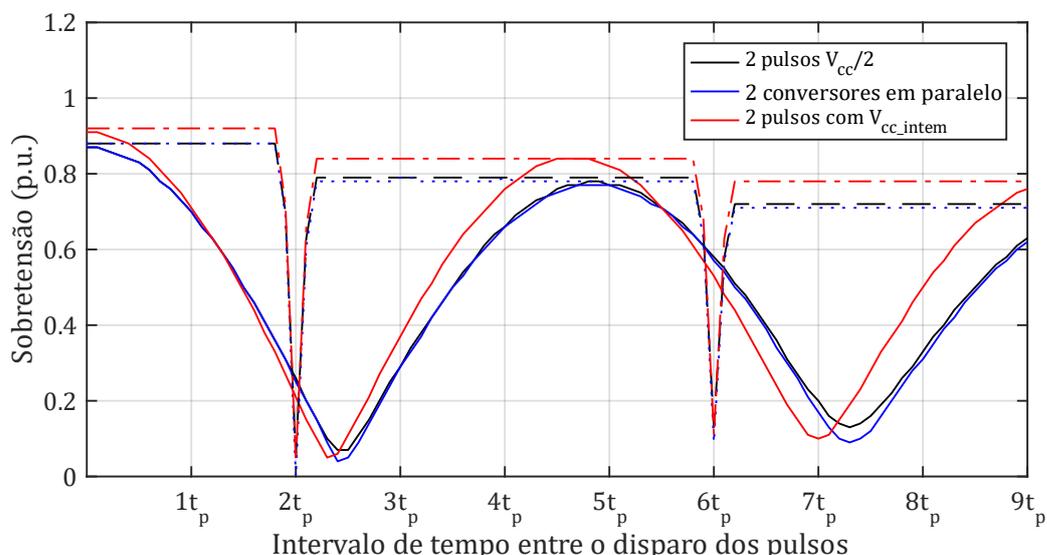


Figura 76 - Valor de pico da sobretensão em razão do intervalo entre o disparo dos pulsos

Na Figura 76 as linhas contínuas resultados apresentam os resultados das simulações que utilizaram o modelo completo com o cabo representado por um segmento π e as linhas tracejadas apresentam os resultados das simulações que utilizaram o modelo simplificado.

A Figura 77 demonstra que, também, existe a influência da quantidade de segmentos π que são utilizados para a representação do cabo.

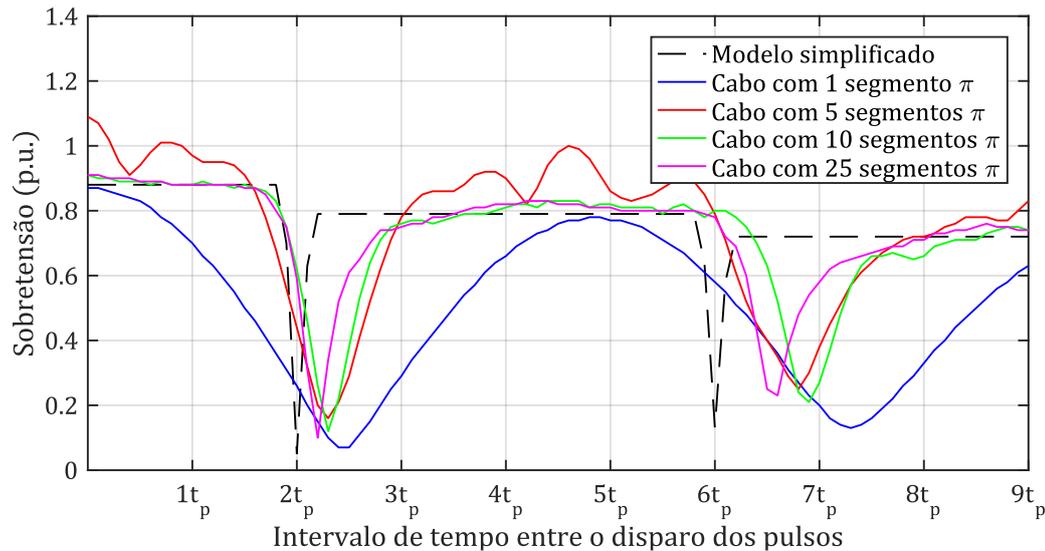


Figura 77 - Valor de pico da sobretensão com superposição de pulsos por conversor de três níveis em razão do intervalo entre o disparo dos pulsos

(KORHONEN et al., 2010) propõe a variação do intervalo de tempo entre os disparos dos pulsos em torno do valor de $2t_p$, a fim de encontrar um mínimo local da sobretensão ocasionada, que seria o ponto ótimo do intervalo de tempo entre disparos. Seguindo essa metodologia de otimização, foram realizadas diversas simulações, para as configurações com conversores de três níveis e conversores em paralelo, cujos resultados ótimos são apresentados na Figura 78, Figura 79 e Figura 80. As simulações utilizaram o modelo completo, com cabo de 30,48 m representado por um segmento π , utilizando os mesmos parâmetros das simulações cujos resultados são apresentados na subseção 6.4.

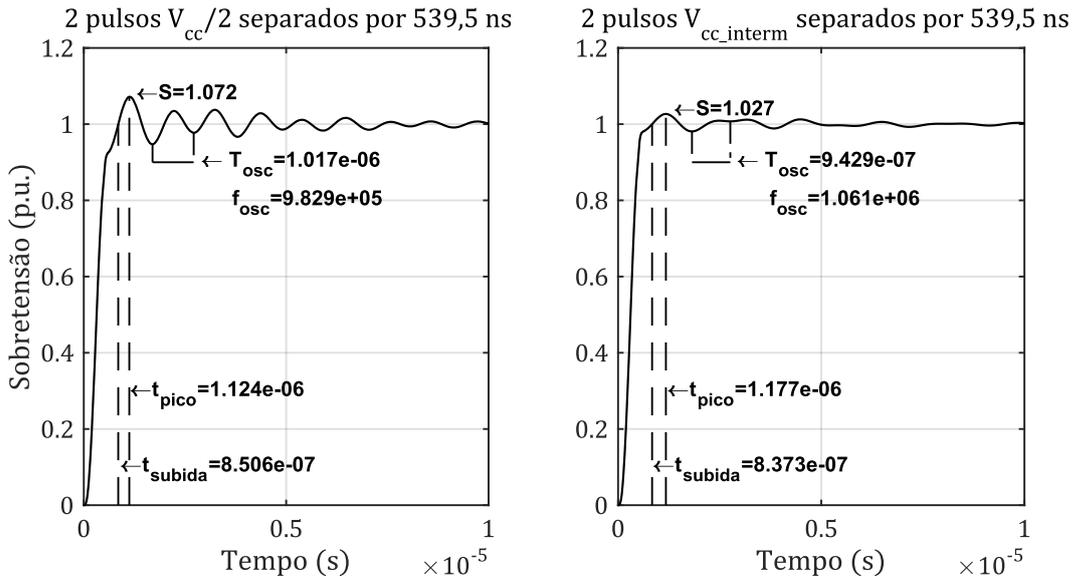


Figura 78 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com superposição de pulsos por conversor de três níveis e por conversor de três níveis com nível intermediário ajustado, cabo de 30,48 m representado por um segmento π

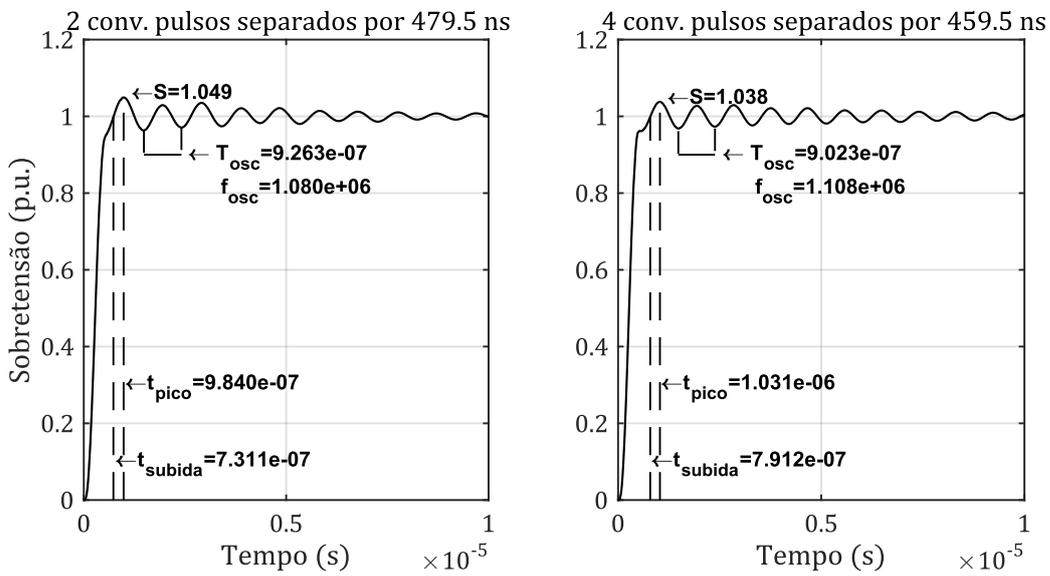


Figura 79 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com dois conversores em paralelo e com quatro conversores em paralelo, cabo de 30,48 m representado por um segmento π

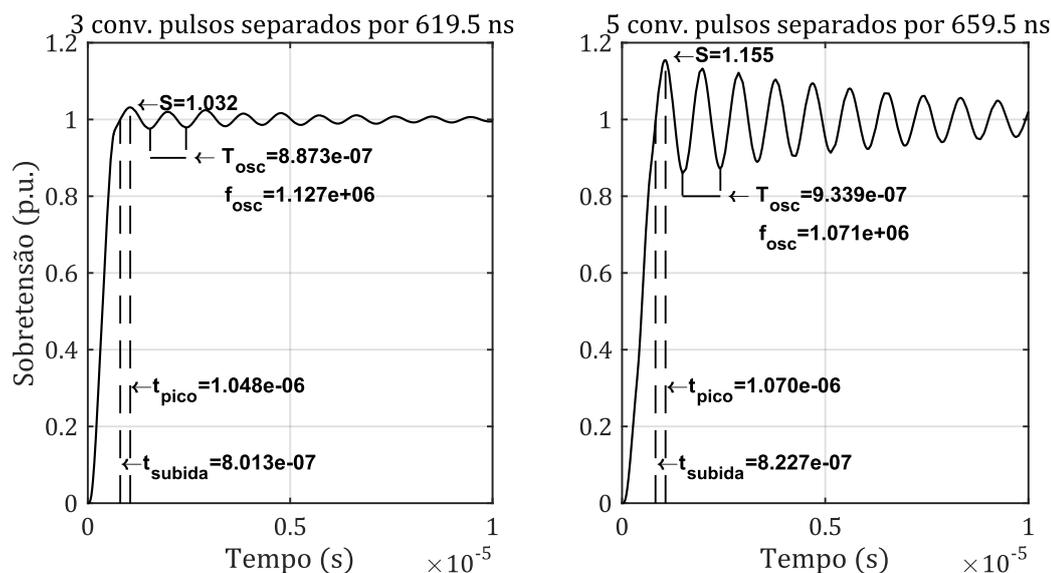


Figura 80 - Resultado de simulação – parâmetros das curvas de sobretensão com três conversores em paralelo e com cinco conversores em paralelo, cabo de 30,48 m representado por um segmento π

Os intervalos de tempo ótimos entre os disparos dos pulsos variaram de um mínimo de 459,5 ns, para a configuração com quatro conversores em paralelo, até um máximo de 659,5 ns, para a configuração com cinco conversores em paralelo. Esses valores são equivalentes à $2,42t_p$ e $3,48t_p$, respectivamente. Para fins de comparação (KORHONEN et al., 2010) apresenta intervalo de tempo ótimo entre os disparos dos pulsos para a configuração de dois conversores em paralelo de $2,69t_p$, e para três conversores em paralelo de $3,18t_p$. As simulações realizadas nesta subseção apresentam intervalo de tempo ótimo entre os disparos dos pulsos de $2,52t_p$ para a configuração com dois conversores em paralelo, e $3,26t_p$ para três conversores em paralelo.

6.6.2. Otimização do Nível Intermediário de Tensão do Conversor de Três Níveis

Assim como ocorre com o intervalo de tempo entre os pulsos, o dimensionamento teórico do nível de tensão intermediário do conversor de três níveis, que deve ser ajustado para a completa supressão da sobretensão proposta por (LEE, 2006), não leva em conta todos os parâmetros representados no modelo completo de simulação.

Por isso, foi realizada uma nova série de simulações, variando o nível de tensão intermediário do conversor, a fim de encontrar um mínimo local da sobretensão ocasionada,

que seria o ponto ótimo desse nível de tensão. Novamente, as simulações utilizaram o modelo completo, com cabo de 30,48 m representado por um segmento π , utilizando os mesmos parâmetros das simulações cujos resultados são apresentados na subseção 6.4.

O resultado da simulação com esse parâmetro otimizado é apresentado na Figura 81.

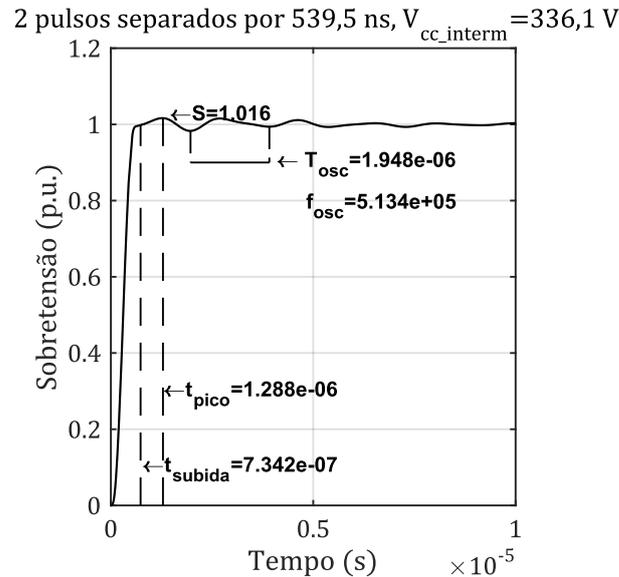


Figura 81 - Resultado de simulação – parâmetros da curva de sobretensão com superposição de pulsos por conversor de três níveis com nível intermediário otimizado, cabo de 30,48 m representado por um segmento π

O valor teórico do nível de tensão intermediário ajustado (V_{cc_interm}) é 0,5301 p. u. ou 328,66 V, o valor ótimo desse parâmetro, encontrado através das simulações é 0,5421 p. u. ou 336,10 V.

6.7. Avaliação Comparativa

A Tabela 12 apresenta um comparativo do valor de pico da sobretensão, para os métodos de redução da sobretensão por superposição de pulsos, antes e depois da otimização dos parâmetros de intervalo de tempo entre os disparos dos pulsos e do nível intermediário da tensão ajustada dos pulsos. Além disso, apresenta a variação percentual dos valores de pico de sobretensão para cada um desses métodos. É importante ressaltar que todos os valores são referentes a simulações com cabo de comprimento de 30,48 m.

Tabela 12 - Pico da sobretensão antes e depois da otimização de parâmetros

Método	Pico da sobretensão sem otimização (p. u.)	Pico da sobretensão após a otimização (p. u.)	Variação
Conv. 3 níveis $V_{cc}/2$	1,369	1,072	-21,7%
Conv. 3 níveis V_{cc_interm}	1,368	<u>1,016</u>	-25,7%
2 conv. em paralelo	1,289	1,049	-18,6%
3 conv. em paralelo	1,468	1,032	-29,7%
4 conv. em paralelo	<u>1,230</u>	1,038	-15,6%
5 conv. em paralelo	1,531	1,155	-24,6%

Houve redução significativa do pico da sobretensão em todos os métodos, alcançando patamares próximos da supressão completa da sobretensão, como é o caso do valor mínimo alcançado de 1,016 p. u..

A Tabela 13 compila os parâmetros extraídos dos resultados das simulações apresentadas nas subseções 6.2, 6.3 e 6.6, após a otimização de alguns parâmetros dos métodos de redução da sobretensão por superposição de pulsos. Os resultados contemplam apenas o comprimento de cabo de 30,48 m.

Tabela 13 - Compilação dos parâmetros obtidos por simulação após otimização de parâmetros

Método	Pico da sobretensão (p. u.)	Tempo de acomodação (μs)	Tempo de subida (ns)	Tempo de pico (ns)	Frequência de oscilação (kHz)	Período de oscilação (μs)
Sem redução	1,837	8,0570	310,4	569,6	945,7	1,057
Filtro RC no motor	1,192	<u>1,1730</u>	<u>480,1</u>	<u>760,8</u>	<u>592,7</u>	<u>1,687</u>
Filtro RLC no conv.	<u>1,000</u>	33,0500	97000,0	-	-	-
Conv. 3 níveis $V_{cc}/2$	1,072	0,8506	850,6	1124,0	982,9	1,017
Conv. 3 níveis V_{cc_interm}	<u>1,016</u>	0,7342	734,2	1288,0	<u>513,3</u>	<u>1,948</u>
2 conv. em paralelo	1,049	<u>0,7311</u>	<u>731,1</u>	<u>984,0</u>	1080,0	0,923
3 conv. em paralelo	1,032	0,8013	801,3	1048,0	1127,0	0,887
4 conv. em paralelo	1,038	0,7912	791,2	1031,0	1108,0	0,902
5 conv. em paralelo	1,155	0,8227	822,7	1070,0	1071,0	0,934

O menor valor de sobretensão obtido segue sendo por meio da aplicação do filtro RLC, que suprime completamente a sobretensão. No entanto, os métodos que utilizam superposição

de pulsos, após o processo de otimização dos parâmetros, apresentaram sobretensão em patamares baixos e possuem uma resposta muito mais rápida do que a do filtro RLC. Tomando como exemplo as configurações mais simples, a de superposição de pulsos por conversor de três níveis e a de superposição de pulsos por dois conversores em paralelo, a sobretensão fica em 1,072 *p.u.* e 1,049 *p.u.*, respectivamente. Dentre esses métodos, o que obteve o melhor resultado foi o de conversor com o nível intermediário ajustado, que passou por dois processos de otimização, um do intervalo entre os disparos dos pulsos e outro do ajuste do nível intermediário da tensão. A sobretensão resultante é de 1,016 *p.u.*.

7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na Seção anterior, concomitantemente com a apresentação dos resultados, apresentaram-se breves discussões acerca desses resultados, dos efeitos de alguns dos parâmetros do sistema nesses resultados e, mesmo, uma avaliação comparativa entre os resultados obtidos, por meio dos diferentes métodos de redução da sobretensão simulados neste trabalho.

Mesmo na subseção 4.5, onde os métodos de redução da sobretensão foram apresentados, resultados preliminares já foram apresentados em caráter ilustrativo.

A fim de não repetir essas discussões, nessa Seção serão apresentados comentários gerais.

O desempenho dos métodos de redução da sobretensão, avaliados por meio dos resultados das simulações, de forma geral, foi adequado. Nota-se que, as sobretensões consideradas foram reduzidas significativamente, ao aplicarem-se os diversos métodos avaliados.

Em um primeiro momento, foram avaliados os métodos de redução da sobretensão conforme apresentados nas referências bibliográficas, sem qualquer processo de otimização dos métodos ou de seus parâmetros. Esses resultados foram apresentados nas subseções 6.3 e 6.4, e comparados na subseção 6.5.

Alguns desses métodos, que utilizam da superposição de pulsos, tiveram o desempenho aquém do esperado. Por exemplo, o método com o conversor de pulsos de três níveis com a tensão de nível intermediário ajustada (V_{cc_interm}). Não se esperava uma completa supressão da sobretensão, como se observou nas simulações com o modelo simplificado, no entanto, se esperava um desempenho consideravelmente melhor do que o método que utiliza o conversor de pulso de três níveis sem nenhum ajuste, com o nível intermediário com tensão $V_{cc}/2$. Além disso, em algumas características, os resultados obtidos com o uso dos filtros passivos foram melhores do que os resultados obtidos pelos métodos que utilizam a superposição de pulsos. O filtro RC nos terminais do motor teve resposta extremamente rápida e pico de sobretensão razoavelmente baixo. Em contrapartida, a flexibilidade apresentada, para diferentes comprimentos de cabo, é baixa. Em caso de alteração do comprimento do cabo, o filtro precisa ser redimensionado. O filtro RLC nos terminais do conversor suprimiu completamente a sobretensão, mas às custas de tornar a curva de subida da tensão no motor extremamente lenta, demorando um tempo maior do que o período da largura do pulso.

Os métodos que utilizam da superposição de pulsos se mostraram flexíveis, os resultados não variaram muito em razão da variação dos parâmetros analisados. As configurações que utilizam conversores de três níveis, além de flexíveis, são bem simples. A configuração que utiliza conversores em paralelo é mais complexa, e se torna cada vez mais complexa à medida que se aumenta o número de conversores. Entretanto, a configuração com dois conversores já apresenta bons resultados e não tem complexidade elevada. Apesar do pequeno espaço amostral, há um indicativo de que as configurações com número par de conversores em paralelo têm desempenho melhor do que as configurações com número ímpar de conversores.

Outros pontos importantes de ressaltar sobre a flexibilidade dos métodos que utilizam superposição de pulsos, são as possibilidades de adequação de conversores de frequência comerciais para realizar essas superposições de pulsos. Uma solução comum para conversores de média tensão é a utilização de topologias que permitam pulsos de diversos níveis. Caso seja possível parametrizar o instante de disparo dos distintos níveis do pulso, de forma que, sejam deslocados no tempo em um intervalo $2t_p$, esse tipo de configuração poderia funcionar como o método de conversor de três níveis, apresentado na subseção 4.5.2.2. Outra solução comum, mas para conversores de alta potência, é a utilização de chaves semicondutoras em paralelo e saída via cabos elétricos em paralelo, para a divisão da corrente elétrica de saída. Caso seja possível parametrizar o instante de disparo das chaves em paralelo, de forma que, sejam deslocados no tempo em um intervalo $2t_p$, esse tipo de configuração poderia funcionar como conversores em paralelo, conforme apresentado na subseção 4.5.2.3.

A adoção dos parâmetros qualitativos e quantitativos para avaliação das curvas de sobretensão permitiu uma observação detalhada dessas curvas e uma comparação objetiva dos resultados obtidos pelos diferentes métodos. A compilação dos dados em tabelas possibilitou uma rápida visualização dos melhores resultados, para cada um dos parâmetros avaliados.

A definição prévia de todos os parâmetros das simulações e a discussão de alguns desses parâmetros, possibilitou a comparação direta entre as simulações e estabeleceu cenários em que todos os métodos de redução da sobretensão foram testados em condições ideais (modelo simplificado), em condições mais próximas do fenômeno físico real (modelo completo), em condição de reflexão parcial do pulso no motor (cabo de 30,48 m) e em condição de reflexão total do pulso no motor (cabo de 100 m).

Por outro lado, não foram conclusivos os estudos sobre o número ideal de segmentos π para representar o cabo em cada uma das diferentes condições simuladas. Serão necessários

novos estudos para melhor avaliar a otimização deste parâmetro e tentar estabelecer uma relação entre o número de segmentos e a precisão dos resultados apresentados pelas simulações.

Após a simulação dos métodos de redução da sobretensão conforme apresentados nas referências bibliográficas, foi realizado um processo de otimização de parâmetros focado nos métodos que utilizam a superposição de pulsos. A partir desse processo foi otimizado o intervalo de tempo entre o disparo dos pulsos e o nível de tensão intermediário do pulso de três níveis. A redução da sobretensão, após a otimização desses parâmetros, foi drástica. A sobretensão alcançou patamares ainda mais baixos, aliados às demais vantagens desses métodos que são a velocidade na resposta da redução da sobretensão e a flexibilidade de ajuste da parametrização dos conversores caso algum parâmetro físico do sistema seja alterado.

É importante ressaltar que, a referida otimização dos parâmetros se deu por um processo de esforço computacional e de diversas simulações. Não foi realizada uma análise teórica sobre a influência dos parâmetros otimizados sobre a sobretensão ocasionada. Cabe conduzir em estudos futuros esse tipo de análise.

Ainda sobre estudos futuros, sugere-se ampliar a análise comparativa dos métodos de redução da sobretensão incorporando também métodos híbridos, que combinem filtros passivos e superposição de pulsos. Esses métodos parecem ser promissores, uma vez que, com o auxílio da superposição dos pulsos, os filtros passivos não precisam ser dimensionados a fim de tornarem o sistema superamortecido, reduzindo assim as perdas no filtro e permitindo que o sistema tenha uma resposta mais rápida.

8. CONCLUSÕES

Foi realizada uma ampla revisão bibliográfica do tema principal e temas correlatos, possibilitando um bom entendimento do estado da arte do tema da pesquisa. Através desta, percebe-se que a redução da sobretensão em motores voltou a despertar o interesse de pesquisadores, atualmente, e que os métodos apresentados, recentemente, têm o intuito de utilizar os conversores de frequências como parte integrante da solução.

Além disso, foi realizada uma breve análise bibliométrica das referências bibliográficas dessa dissertação, na qual, observou-se que, existem muitas conexões diretas de citação entre os artigos, e conexões indiretas de acoplamento bibliográfico de artigos e autores, e de cocitações de artigos e autores. Muitas dessas conexões apresentam grande acoplamento, indicando que vários desses artigos e autores compartilham uma grande parte das referências bibliográficas listadas em seus artigos. Dessa forma, acredita-se que as referências bibliográficas dessa dissertação contam com uma base bibliográfica comum, que é referência para os demais pesquisadores da área.

Sobre os aspectos conceituais, apresentou-se, de forma detalhada, a sobretensão, a sua formação, seus fatores geradores, suas características transitórias e a sua modelagem matemática. Essa modelagem matemática foi apresentada no domínio do tempo, de forma iterativa, que foi sumarizada por meio de uma somatória, que pôde ser desdobrada em uma função polinomial, representada na Equação (22); e apresentada no domínio das frequências, sumarizada por meio de uma função de transferência, representada pela Equação (29) e desdobrada em diagrama de blocos, conforme a Figura 13. De forma semelhante, foram expostos os métodos de redução da sobretensão, incluindo a modelagem matemática, os diagramas de bloco e os resultados de simulações ilustrativas. Foram, também, expostos e discutidos os modelos físicos de simulação da sobretensão e dos seus métodos de redução.

Com relação à metodologia proposta nessa dissertação, é possível afirmar que ela possibilitou a avaliação individual e comparativa dos resultados das simulações, de forma precisa e objetiva. As simulações dos diferentes métodos de redução de sobretensão foram realizadas em cenários idênticos, com premissas e parâmetros idênticos. Para fins de comparação com os métodos de redução de sobretensão por superposição de pulsos, o objeto principal desse estudo, foi definida a simulação de referência, sem qualquer método de redução da sobretensão, e as simulações com soluções convencionais, utilizando filtros passivos.

A parametrização das curvas de tensão no motor, resultantes das simulações, auxiliou na identificação de pontos positivos e negativos de cada um dos métodos de redução da sobretensão. Além disso, a compilação dos dados em tabelas possibilitou uma rápida visualização dos melhores resultados, para cada um dos parâmetros avaliados.

Todas as simulações propostas foram realizadas, parametrizadas conforme elas são apresentadas nas referências bibliográficas possibilitando a avaliação de todos os métodos de redução da sobretensão contidos nesse estudo. Algumas simulações adicionais foram realizadas a fim de observar o efeito da variação de alguns dos parâmetros dos modelos de simulação na sobretensão resultante no motor.

Todos os métodos avaliados nas simulações foram eficazes, mostrando redução significativa dos níveis de sobretensão. Em um primeiro momento, os métodos que utilizam superposição de pulsos foram menos eficientes do que se esperava, reduzindo a sobretensão, mas não para níveis tão significativos. Pode-se mencionar que, isso pode ser resultante de efeitos capacitivos e indutivos dos componentes do sistema, que foram ignorados na formulação do método, e em partes, por conta da parametrização e configuração das simulações. Esses efeitos capacitivos e indutivos alteram a forma dos pulsos que são refletidos no cabo elétrico, dessa forma alteram o momento da ocorrência da reflexão do pico desses pulsos.

A fim de avaliar a melhoria do desempenho dos métodos que utilizam superposição de pulsos, foram conduzidos processos de otimização de dois parâmetros das simulações: o intervalo de tempo entre o disparo dos pulsos e o nível intermediário de tensão do pulso de três níveis. Esses parâmetros foram variados em um espectro próximo do valor teórico apontado para esses parâmetros, foi traçada uma curva do valor do pico da sobretensão em razão do valor desses parâmetros e foram identificados os mínimos locais. Esses mínimos locais foram considerados como os valores otimizados desses parâmetros.

Após o referido processo de otimização, para todos os métodos de superposição de pulsos, os valores de sobretensão foram reduzidos para patamares muito baixos. A redução média foi de 22,7%. Como exemplo, para o caso do comprimento de cabo de 30,48 m, a maior sobretensão obtida foi de 1,155 p. u. (cinco conversores em paralelo) e a menor sobretensão foi de 1,016 p. u. (conversor de três níveis com nível de tensão intermediária otimizado). Esses resultados indicam que esses métodos apresentam grande potencial de redução da sobretensão, aliado à boa velocidade da resposta e à flexibilidade de parametrização dos conversores para adaptação a diferentes comprimentos de cabo.

Ao fim da otimização de parâmetros, todos os métodos de superposição de pulsos obtiveram maior redução da sobretensão do que a adoção de filtro RC nos terminais do motor, e respostas muito mais rápidas do que a adoção de filtro RLC nos terminais do conversor.

É importante enfatizar que, os métodos que utilizam da superposição de pulsos para redução da sobretensão, partem de uma premissa que os conversores de frequência, até então caracterizados como causadores ou potencializadores da sobretensão, podem ser parte integrante dos métodos de redução dessa mesma sobretensão.

8.1. Propostas de Trabalhos Futuros

A seguir são apresentados estudos que poderão ser conduzidos a fim de ampliar os conhecimentos relativos ao tema estudado nesta dissertação.

8.1.1. Otimização do Número de Segmentos π para a Representação dos Cabos

Realizar simulações com cabos representados por diferentes números de segmentos π para avaliação da influência e da complexidade dessa representação nos resultados obtidos. Tentar relacionar as conclusões desse estudo com a recomendação de boa prática descrita pela Equação (53), apresentada em (PAUL, 2006).

Como resultado espera-se um melhor entendimento da relação entre o número de segmentos π utilizados na representação do cabo, as componentes de frequências presentes no pulso, a frequência de oscilação da sobretensão e o comprimento dessas ondas. Espera-se também otimizar os modelos das simulações.

8.1.2. Avaliação de Métodos Híbridos

Avaliar o método híbrido proposto por (HAIDER et al., 2020), que combina a adoção de um filtro LC na saída do conversor com a estratégia de superposição de pulsos com conversor de pulso de três níveis. Com a combinação desses dois métodos, o filtro LC pode ser dimensionado como um filtro subamortecido, e não superamortecido como o filtro RLC

proposto por (VON JOUANNE; ENJETI, 1997), não havendo assim o problema de redução tão grande do tempo de subida da tensão no motor.

Espera-se obter bom desempenho e conciliar as vantagens dos dois métodos. Adicionalmente, pode-se propor novas configurações e combinações de métodos de redução da sobretensão.

8.1.3. Avaliação de Diferentes Combinações de Pulsos

As configurações de conversores em paralelo permitem diferentes combinações de pulsos, aumentando as possibilidades de estratégias conjuntas de chaveamento dos conversores. A Figura 82 apresenta um exemplo de combinação diferente de pulso para a configuração com dois conversores em paralelo.

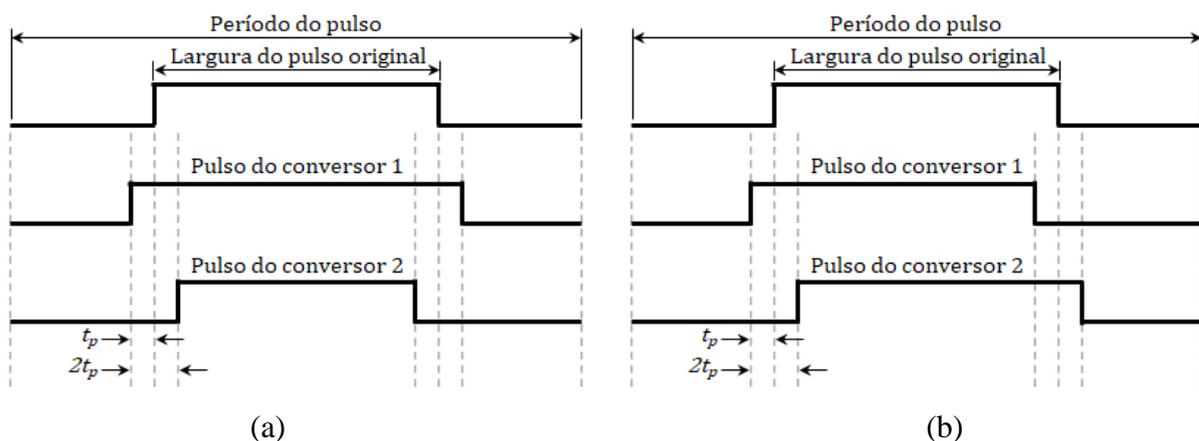


Figura 82 - Combinação de pulsos para dois conversores em paralelo

(a) pulsos de largura diferente e (b) pulsos de largura idêntica deslocados no tempo

Uma análise parcial desse tema já foi apresentada em (DE PAULA DOS SANTOS; SARTORI, 2018), inclusive apresentando o desbalanceamento na circulação de correntes entre os cabos conectados em paralelo. Propõe-se um estudo do tema com maior abrangência e com análise do impacto dessas combinações de pulso na circulação das correntes nos cabos, nas perdas e no aquecimento dos cabos; na circulação das correntes, nas perdas no aquecimento das chaves semicondutoras.

Espera-se encontrar configurações e combinações de pulsos que otimizem a redução da sobretensão e/ou melhorem o balanceamento da circulação das correntes nos cabos.

8.1.4. Análise Teórica da Otimização de Parâmetros

Uma análise teórica da otimização dos parâmetros dos métodos de redução da sobretensão por superposição de pulsos deve ser conduzida, inclusive dos parâmetros já otimizados nessa dissertação (intervalo de tempo entre o disparo dos pulsos e nível intermediário de tensão do conversor de três níveis), uma vez que a otimização apresentada nesse trabalho foi realizada através de uma série de simulações, por meio de esforço computacional.

Além disso, avaliar se o valor ótimo do intervalo de tempo entre o disparo dos pulsos ($\Delta t_{d_otimizado}$), para diferentes comprimentos de cabo, pode ser representado como uma função do tempo de propagação da onda no cabo (t_p), ou seja, $\Delta t_{d_otimizado} = f(t_p)$.

8.1.5. Análise da Aplicabilidade dos Métodos de Redução de Sobretensão em Configurações Convencionais de Conversores de Frequências

Avaliar se configurações e topologias de conversores de frequência convencionais na indústria também podem se beneficiar dos métodos de redução da sobretensão por superposição de pulsos, como por exemplo: conversores que possuem mais de uma chave semicondutora em paralelo, para dividir a corrente e as perdas e assim não sobreaquecer; conversores que possuem vários módulos de chaveamento em paralelo, conectados à cabos em paralelo, e que são conectados em um ponto comum tanto nos terminais do conversor como nos terminais do motor; e módulos de conversor “*multidrive*”, que acionam simultaneamente vários motores

9. REFERÊNCIAS

AKAGI, H.; MATSUMURA, I. Overvoltage mitigation of inverter-driven motors with long cables of different lengths. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2011.

AMARIR, S.; AL-HADDAD, K. A new reflected wave modeling technique for PWM ASD-Motors. In: IEEE International Symposium on Industrial Electronics, **Anais...2006a**. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee.org.ez67.periodicos.capes.gov.br/document/4078642>>.

AMARIR, S.; AL-HADDAD, K. A new high frequency modeling technique of travelling waves in long cable PWM drives. In: IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), Paris, France. **Anais...** Paris, France: IEEE, 2006b. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4153615>>. Acesso em: 8 fev. 2021.

AMARIR, S.; AL-HADDAD, K. A new design tool to protect industrial long-cable PWM ASD systems against high-frequency overvoltage problems. In: Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, **Anais...IEEE**, 2008a. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4721624/>>.

AMARIR, S.; AL-HADDAD, K. Over-voltages computation algorithm for motors fed from long cable PWM drives. In: Proceedings of the Mediterranean Electrotechnical Conference - MELECON, **Anais...IEEE**, 2008b. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4618493/>>.

AMARIR, S.; AL-HADDAD, K. Novel mathematical formulas for incident and reflected waves for Differential Mode analysis in long cable ASDs with experimental validations. In: IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), Orlando, FL, USA. **Anais...** Orlando, FL, USA: IEEE, 2008c. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4758141/>>.

AMARIR, S.; AL-HADDAD, K. Mathematical analysis and experimental validation of transient over-voltage higher than 2 per unit along industrial ASDM long cables. In: PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, **Anais...IEEE**, 2008d. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4592212/>>.

AMARIR, S.; AL-HADDAD, K. A modeling technique to analyze the impact of inverter supply voltage and cable length on industrial motor-drives. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2008e. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee.org.ez67.periodicos.capes.gov.br/document/4463845>>.

AMARIR, S.; AL-HADDAD, K. A new mathematical tool to investigate the influence of cable characteristics and IGBT fast switching on voltage transients and differential mode currents for PWM drives. In: Mathematics and Computers in Simulation, 2, **Anais...**2010. Disponível em: <<https://www-sciencedirect.ez67.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0378475410000467?via%3Dihub>>.

AOKI, N.; SATOH, K.; NABAE, A. Damping circuit to suppress motor terminal overvoltage and ringing in pwm inverter-fed ac motor drive systems with long motor leads.

IEEE Transactions on Industry Applications, 1999.

BONNETT, A. H. A comparison between insulation systems available for pwm-inverter-fed motors. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 1997.

BURKART, R. M.; KOLAR, J. W. Comparative Life Cycle Cost Analysis of Si and SiC PV Converter Systems Based on Advanced η - ρ - σ Multiobjective Optimization Techniques. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2017.

CARDOSO, J. R. **Engenharia eletromagnética**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

D'AJUZ, A. **Transitorios eletricos e coordenação de isolamento: aplicação em sistemas de potencia de alta-tensão**. [s.l.] EDUFF, 1987.

DE CARO, S. et al. Over-voltage mitigation on SiC based motor drives through an open end winding configuration. In: 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2017, **Anais...**2017.

DE PAULA DOS SANTOS, D.; SARTORI, C. A. F. Impact of mismatch cables impedances on active motor terminal overvoltage mitigation using parallel voltage source inverters. In: 2017 IEEE 3rd Global Electromagnetic Compatibility Conference, GEMCCON 2017, **Anais...**2018.

DE PAULA DOS SANTOS, D.; SARTORI, C. A. F. Análise comparativa de métodos ativos de redução de sobretensão em motores por superposição de pulsos. In: Niterói, RJ, Brazil. **Anais...** Niterói, RJ, Brazil: SBMAG and SBMO, nov. 2020. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/31778>>. Acesso em: 7 mar. 2021.

HAIDER, M. et al. Analysis and Evaluation of Active/Hybrid/Passive dv/dt-Filter Concepts for Next Generation SiC-Based Variable Speed Drive Inverter Systems. In: ECCE 2020 - IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Detroit, MI, USA. **Anais...** Detroit, MI, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 11 out. 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9236148>>. Acesso em: 7 mar. 2021.

HANIGOVSKI, N.; POULSEN, J.; BLAABJERG, F. A novel output filter topology to reduce motor overvoltage. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2004.

KORHONEN, J. et al. Active motor terminal overvoltage mitigation method for parallel two-level voltage source inverters. In: 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2010 - Proceedings, **Anais...**2010.

LEE, S. C. Perfect wave oscillation suppression with reflection coefficients adaptation in PWM motor drives with long feeding cables. **IEE Proceedings: Electric Power Applications**, 2006.

LEE, S. C.; NAM, K. H. Overvoltage suppression filter design methods based on voltage reflection theory. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2004.

LEE, S.; NAM, K. An overvoltage suppression scheme for ac motor drives using a half dc-link voltage level at each PWM transition. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2002.

MELFI, M. et al. Effect of surge voltage risetime on the insulation of low-voltage machines fed by pwm converters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 34, n. 4, p. 766–775, 1998.

MELHORN, C. J.; TANG, L. Transient effects of PWM drives on induction motors. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 1997.

MIRAFZAL, B. et al. Universal induction motor model with low-to-high frequency-response characteristics. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 43, n. 5, p. 1233–1246, set. 2007.

MOREIRA, A. F. et al. Modeling and Evaluation of dv/dt Filters for AC Drives with High Switching Speed. In: 9th European Conference on Power Electronics and Applications, **Anais...**2001.

MOREIRA, A. F. et al. High-frequency modeling for cable and induction motor overvoltage studies in long cable drives. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2002.

MOREIRA, A. F. et al. Filter networks for long cable drives and their influence on motor voltage distribution and common-mode currents. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2005.

NARANG, A. et al. Measurement and analysis of surge distribution in motor stator windings. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 4, n. 1, p. 126–134, mar. 1989.

NAUMANEN, V. et al. Mitigation of high du/dt -originated motor overvoltages in multilevel inverter drives. **IET Power Electronics**, 2010.

PAUL, C. R. **Introduction to Electromagnetic Compatibility: Second Edition**. [s.l.: s.n.]

PERSSON, E. Transient Effects in Application of PWM Inverters to Induction Motors. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 1992.

SAUNDERS, L. A. et al. Riding the reflected wave - IGBT drive technology demands new motor and cable considerations. **Record of Conference Papers - Annual Petroleum and Chemical Industry Conference**, p. 73–84, 1996.

SKIBINSKI, G. et al. Reflected wave modeling techniques for PWM AC motor drives. In: Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, **Anais...**1998.

VON JOUANNE, A. et al. Filtering techniques to minimize the effect of long motor leads on pwm inverter-fed ac motor drive systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 1996.

VON JOUANNE, A.; ENJETI, P. N. Design considerations for an inverter output filter to mitigate the effects of long motor leads in ASD applications. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 33, n. 5, 1997.

XIONG, H.; ZHANG, J.; VON JOUANNE, A. Control of Variable Frequency Drive PWM to Mitigate Motor Overvoltage Due to Double Pulsing in Reflected Wave Phenomenon. **2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2018**, p. 6563–6570, 3 dez.

2018.

YI, P.; MURTHY, P. K. S.; WEI, L. Performance evaluation of SiC MOSFETs with long power cable and induction motor. In: ECCE 2016 - IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Proceedings, **Anais...IEEE**, 2016. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7855344>>.

YUEN, K. K. F.; CHUNG, H. S. H.; CHEUNG, V. S. P. An active low-loss motor terminal filter for overvoltage suppression and common-mode current reduction. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2012.

ZANETTA, L. C. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência Vol. 52**. [s.l.] EDUSP, 2003. v. 52

APÊNDICE A – Análise Bibliométrica

Uma breve análise da relação entre os autores e os artigos utilizados como base bibliográfica para a elaboração dessa dissertação é apresentada neste apêndice. Para tal serão apresentados os seguintes mapas bibliométricos:

- Mapa de relação de citações – Figura 83, página 152 – a relação direta entre um artigo e outro, quando um artigo A cita o artigo B, ou vice-versa;
- Mapa de acoplamento bibliográfico de artigos – Figura 84, página 153 – a relação indireta entre as referências bibliográficas de dois artigos, quando o artigo A e o artigo B têm pelo menos uma referência bibliográfica em comum. Quanto maior o número de referências em comum, maior o acoplamento bibliográfico entre os artigos;
- Mapa de acoplamento bibliográfico de autores – Figura 85, página 154 – a relação indireta entre dois autores que citam um terceiro autor em comum, quando o autor A e o autor B citam pelo menos um autor em comum. Quanto maior o número de autores citados em comum, maior o acoplamento bibliográfico entre os autores;
- Mapa de relação de cocitações de artigos – Figura 86, página 155 – a relação indireta entre dois artigos que são citados por um terceiro artigo, quando ambos os artigos A e B são citados por um artigo C, ou seja, A e B estão nas referências bibliográficas de dos artigos de C. Quanto maior o número de artigos que citam tanto A quanto B, maior a relação de co-citação entre eles; e
- Mapa de relação de co-citações de autores – Figura 87, página 156 – a relação indireta entre dois autores que são citados por um terceiro autor, quando ambos os autores A e B são citados por um autor C, ou seja, A e B estão nas referências bibliográficas de C. Quanto maior o número de autores que citam tanto A quanto B, maior a relação de co-citação entre eles.

Nos mapas, o tamanho dos nós é proporcional à quantidade de vezes que o artigo ou autor é citado, ou co-citado, e a espessura das linhas é proporcional à quantidade de vezes que um desses nós citou, ou co-citou, o outro. Além disso, os artigos e autores são agrupados em *clusters* da mesma cor, em razão da similaridade dos termos que são encontrados nesses artigos. A proximidade entre nós no mapa também está relacionada à similaridade dos termos encontrados nos artigos.

Os mapas bibliométricos apresentados a seguir foram construídos utilizando o software VOSviewer[®] versão 1.6.18. A base de dados utilizada foi o arquivo de metadados da lista de artigos apresentada na Seção 9, REFERÊNCIAS, excluídos os livros didáticos. Essa base de dados foi obtida através da plataforma Scopus (www.scopus.com).

Desde a Figura 83 até a Figura 87, é possível observar que em todos os mapas bibliométricos existem muitas conexões de citação entre os artigos (conexões diretas), e conexões de acoplamento bibliográfico de artigos e autores (conexões indiretas), e de cocitações de artigos e autores (conexões indiretas). Muitas dessas conexões apresentam grande acoplamento, indicando que vários desses artigos e autores compartilham uma grande parte das referências bibliográficas listadas em seus artigos. Isso indica que as referências bibliográficas do presente trabalho contam com uma base bibliográfica comum, que é referência para os demais pesquisadores da área.

Rede:

30 nós

81 conexões

3 clusters

Clusters:

Verde: Estudo da sobretensão

Vermelho: Redução da sobretensão

Azul: Indefinido

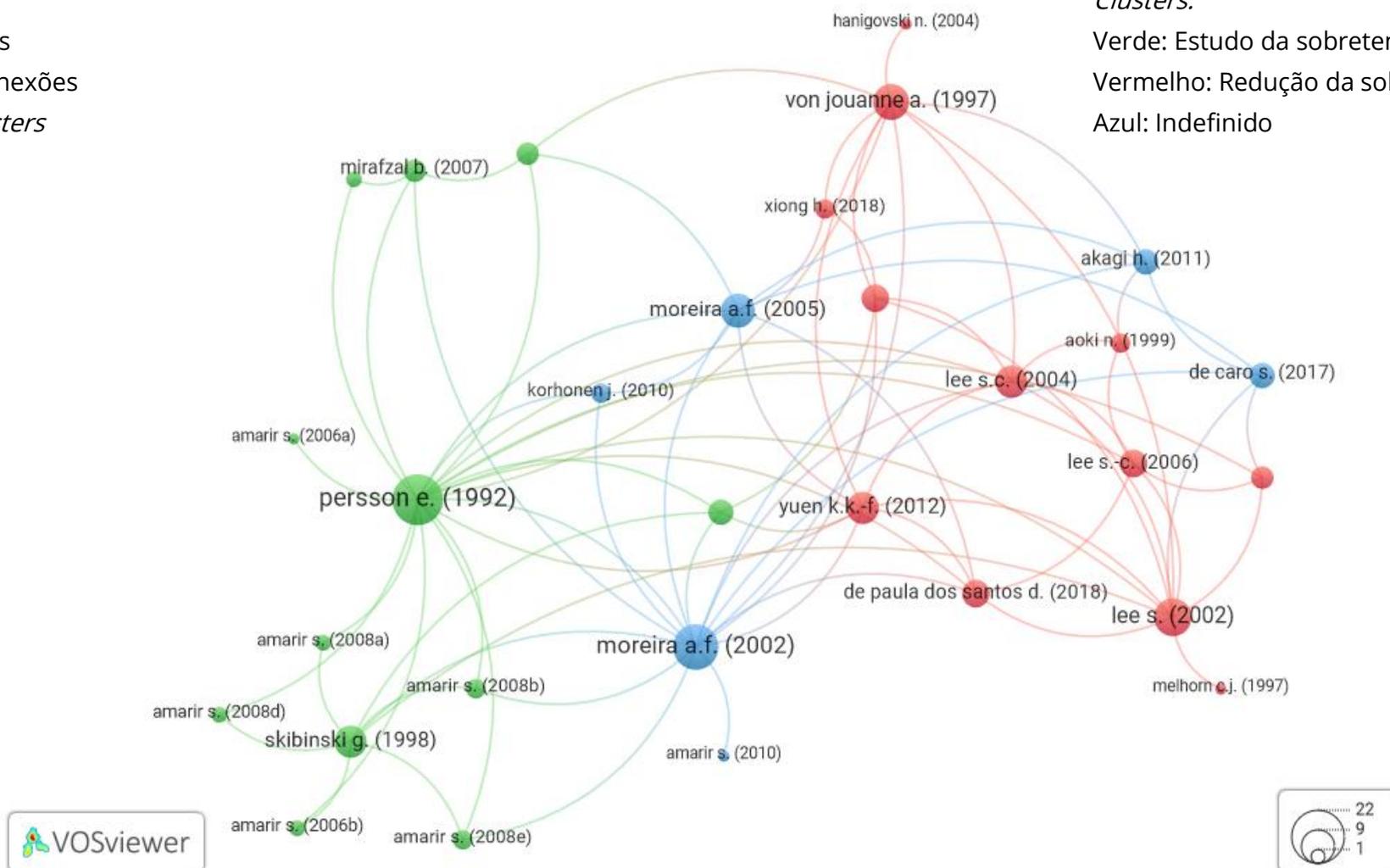


Figura 83 – Mapa bibliométrico de citações

Rede:

35 nós

267 conexões

12 clusters

(9 deles com somente um elemento)

Clusters:

Verde: filtros passivos para a redução da sobretensão

Vermelho: métodos ativos para a redução da sobretensão

Azul: artigos de S. Amarir de 2006 a 2008

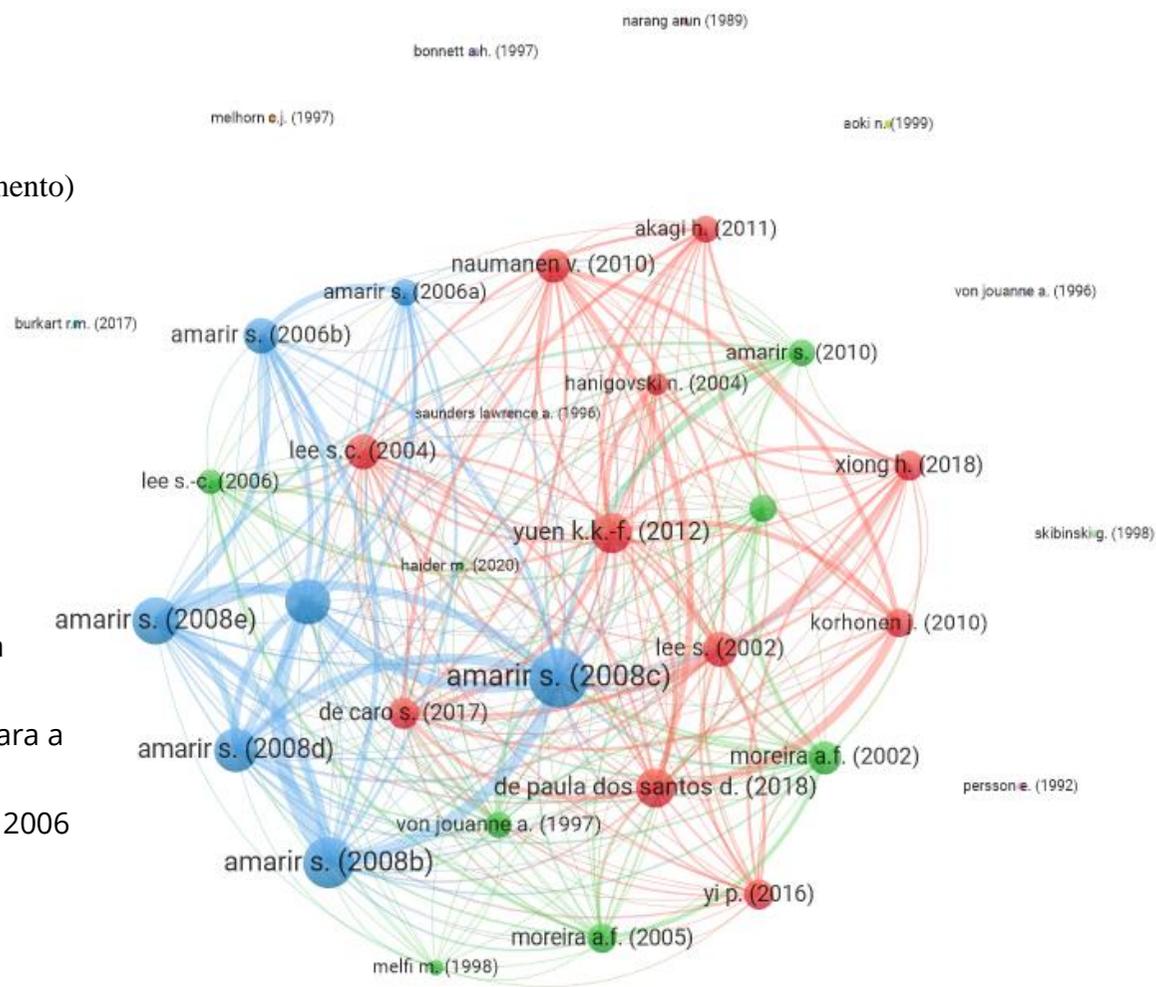


Figura 84 – Mapa bibliométrico de acoplamento bibliográfico de artigos

Rede:

29 nós (somente os primeiros autores com alguma conexão no nó)

245 conexões

6 clusters

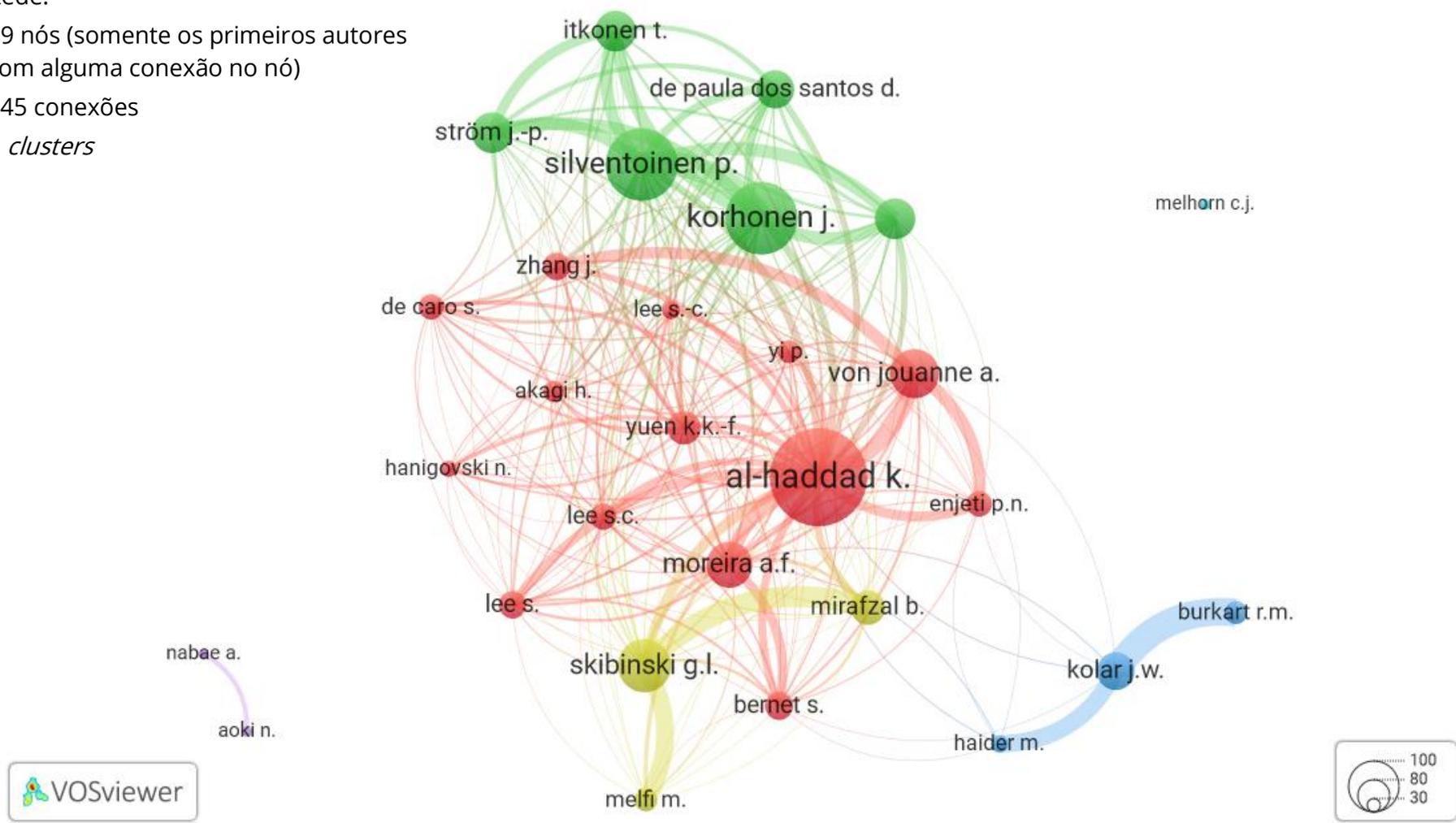


Figura 85 – Mapa bibliométrico de acoplamento bibliográfico de autores

Rede:

30 nós (somente artigos com mais de 2 cocitações)

122 conexões

4 clusters

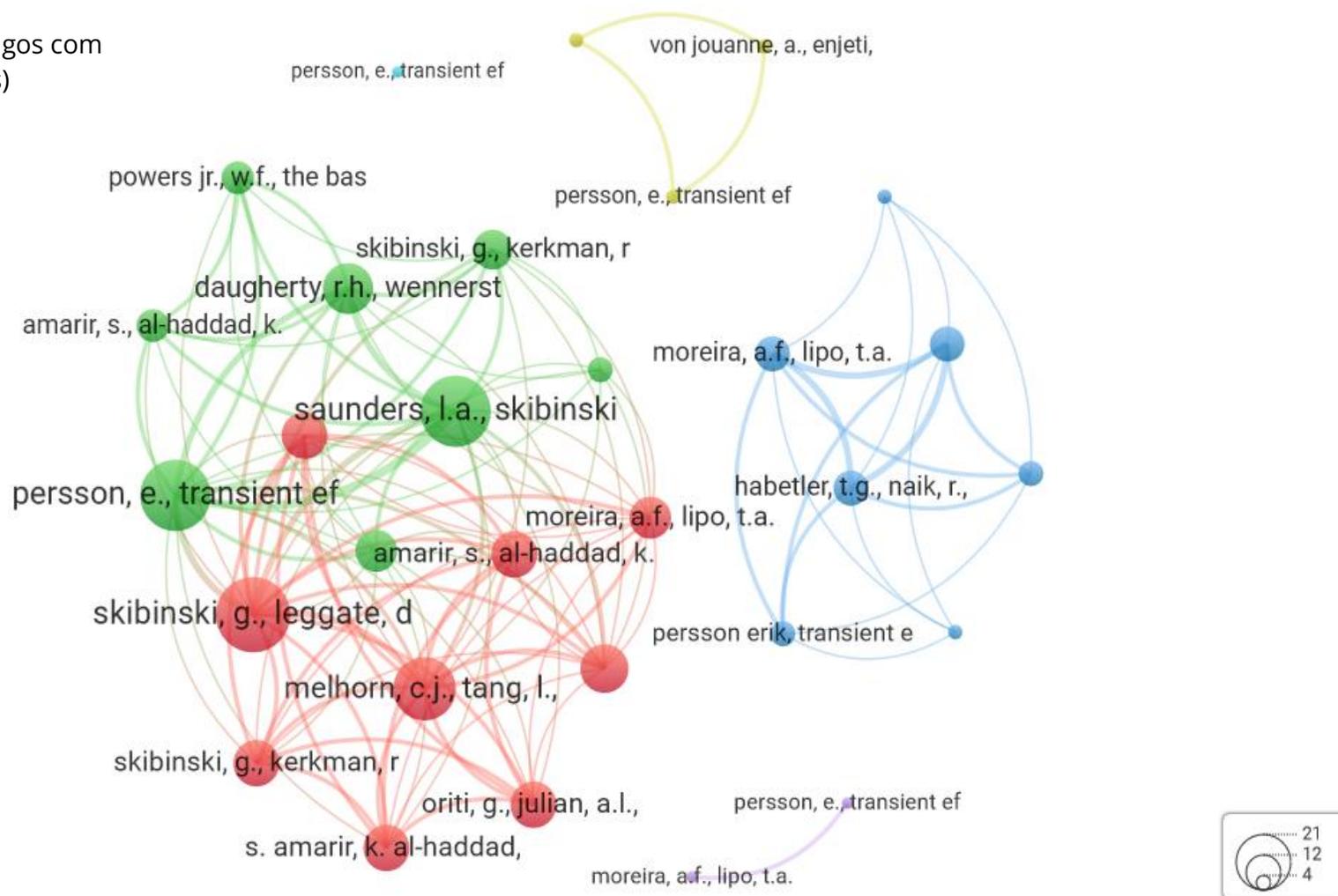


Figura 86 – Mapa bibliométrico de cocitações de artigos

Rede:

53 nós

1034 conexões

4 clusters

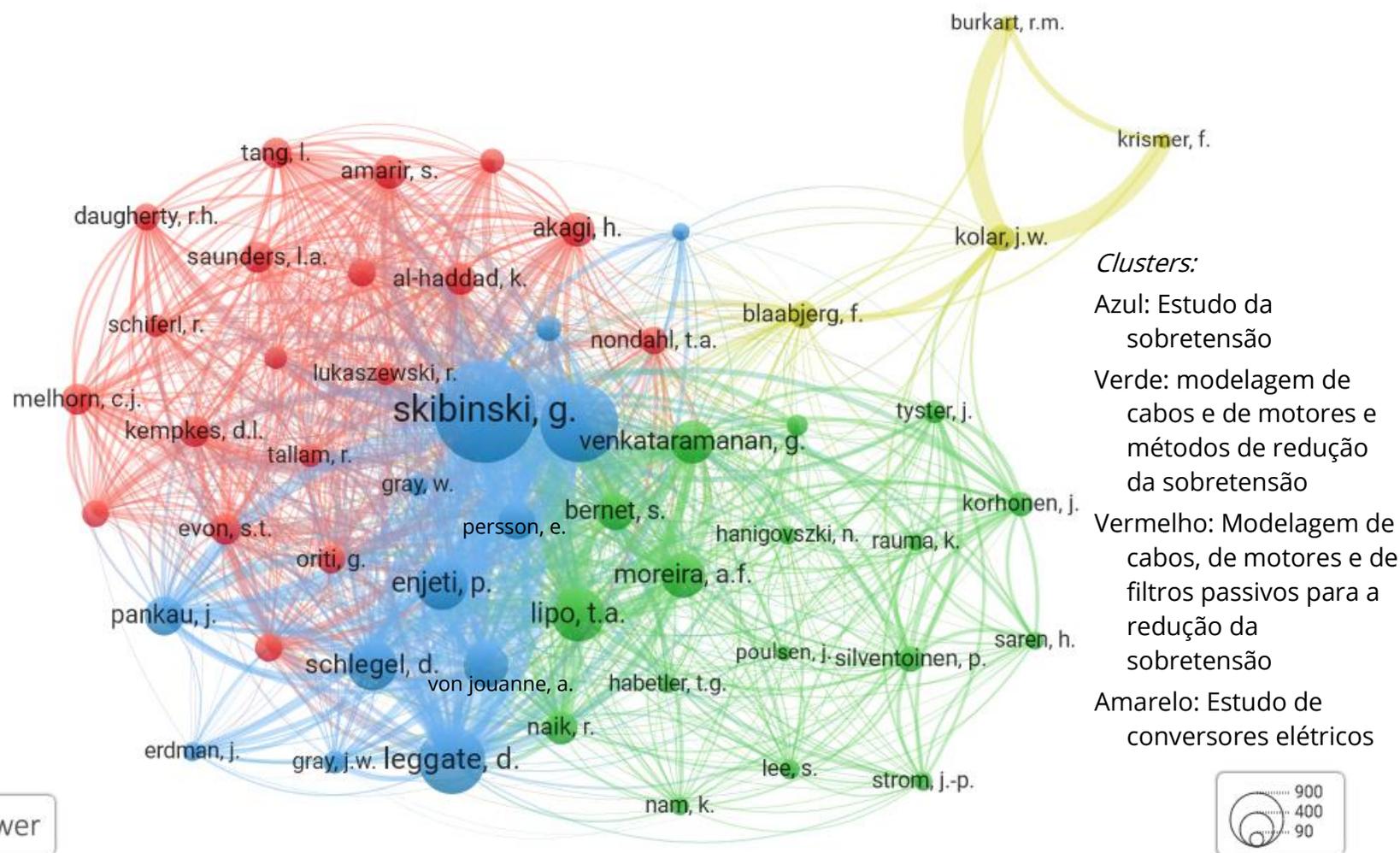


Figura 87 – Mapa bibliométrico de co-citações de autores