Lino Timóteo Conceição de Brito

ANÁLISE DO SUPORTE DE REATIVOS EM UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA COM LINK HVDC

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. André Christóvão Pio Martins

Bauru

2013

Brito, Lino Timóteo Conceição.
Análise do suporte de reativos em um sistema elétrico de potência com link HVDC / Lino Timóteo Conceição de Brito, 2013
124 f. il.

Orientador: André Christóvão Pio Martins

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2013

1. High voltage direct current. 2. Modelo clássico. 3. Static var compensator. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE BAURU
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE LINO TIMÓTEO CONCEIÇÃO DE BRITO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 18 dias do mês de dezembro do ano de 2012, às 10:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA SEÇÃO TÉCNICA DE PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. ANDRÉ CHRISTÓVÃO PIO MARTINS do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. NEWTON GERALDO BRETAS do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Prof. Dr. PEDRO DA COSTA JUNIOR do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de LINO TIMÓTEO CONCEIÇÃO DE BRITO, intitulado "ANÁLISE DO SUPORTE DE REATIVOS EM UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA COM LINK HVDC". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. ANDRÉ CHRISTÓVÃO PIO MARTINS

Prof. Dr. NEWTON GERALDO BRETAS

Prof. Dr. PEDRO DA COSTA JUNIOR

Este trabalho é dedicado à minha mãe e ao meu pai, que me deram um forte apoio para conseguir essa realização, à minha irmã e à minha namorada que me ajudaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço fortemente ao professor doutor André Christóvão Pio Martins, meu orientador, pela paciência e atenção que foi dada nos momentos de dificuldades com a elaboração deste trabalho. Agradeço também à Universidade Estadual Paulista pela oportunidade de eu dar esse importante passo para frente.

“A coisa mais bela que podemos experimentar é o mistério. Essa é a fonte de toda a arte e ciências verdadeiras”.

Albert Einstein

RESUMO

BRITO, L. T. C. (2012). *Análise do Suporte de Reativos em um Sistema Elétrico de Potência com Link HVDC.* Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Bauru. Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2012

.

A transmissão em corrente contínua vem sendo muito valorizada devido a seus baixos custos em relação à transmissão em corrente alternada, principalmente para grandes distâncias com o uso de menos cabos para o suprimento de energia em relação ao HVAC (*High Voltage Alternating Current*). Os dispositivos FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*) foram projetados para fornecer um melhor controle e qualidade de energia transmitida, podendo ser conectados na estação geradora ou na carga. Esses dispositivos melhoram a estabilidade e o suprimento de tensão e potência, sendo muito útil para aumentar a capacidade de transmissão de energia. O presente trabalho analisa a tensão, corrente, potência ativa e reativa consumida pelos conversores na entrada e saída dos filtros, usando um banco de capacitores, e posteriormente, substituindo o banco de capacitores por um SVC (*Static Var Compensator*) em um circuito HVDC-Clássico. O circuito analisado consiste de uma geração em 60Hz, 500kV que transmite potência para uma estação de 345kV e 50Hz. Assim, também analisa a eliminação de harmônicos de corrente, comum no conversor de 12 pulsos, e o suporte de reativos para os casos de tensão e corrente reduzidos e uma falta aplicada no lado AC do inversor.

ABSTRACT

BRITO, L. T. C. (2012). *Reactive Staff Analysis in an Electrical Power System with HVDC Link.* M. Dissertation - Faculdade de Engenharia de Bauru. Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2012.

The DC transmission has been very prized due the its lower costs relative to the AC transmission, mainly for long distances and with the useful of less cables to supply energy in relation at the HVAC (High Voltage Alternating Current). The FACTS devices (Flexible Alternating Current Transmission System) were designed to supply a better control and quality of transmitted energy, and can be connected at generator station or at load. These devices improve the stability and the capacity to supply voltage and power, being very useful to increase the transmission capacity of energy. The present work analyses the voltage, current, active e reactive power consumed by the converters, before and after the filters, using a capacitor banks, and after that, replacing the capacitor bank by a SVC (Static Var Compensator) in a Classical HVDC circuit. The analyzed circuit consists of a 60Hz, 500kV generation which transmits power for a 50Hz, 345kV station. Then, also analyses the current harmonic distortion elimination, common in the 12 pulses converter, and the reactive staff for reduced voltage and current and a 3-phase fault on the inverter AC side.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Um dos dois conversores de frequência de 40/60Hz da estação hidroelétrica de Mechanicville, Nova York 20
Figura 1.2 – Esquemas de linhas de transmissão para o HVDC e HVAC. 22
Figura 1.3 – Esquema de torres para o HVAC e HVDC. 23
Figura 1.4 – Comparação de linhas de transmissão em HVDC e HVAC para custos em relação à distância 23
Figura 3.1 – Sistema HVDC monopolar. 42
Figura 3.2 – Sistema HVDC bipolar. 43
Figura 3.3 – Monopolo equivalente do HVDC. 43
Figura 3.4 – Sistema HVDC mostrando os reatores de alisamento, impedância da linha e válvulas conversoras. 45
Figura 3.5 – Tap HVDC em um sistema HVDC bipolar, mostrando as estações retificadoras e inversoras. O tap HVDC possui um inversor para atender as cargas. 46
Figura 3.6 – Conversor DC do Tap HVDC, sendo possível drenar potência do HVDC. Nesse conversor foi usado um transformador com núcleo de ar. 47
Figura 3.7 – (a) Esquema unifilar do SVC. (b) Curva tensão – corrente para o ponto de conexão do SVC. 49
Figura 4.1 - Esquema do elo DC para o modelo SVC-HVDC. 50
Figura 4.2 – Modelo equivalente para o elo DC do SVC-HVDC. 52
Figura 4.3 – Modelo de elo DC para o HVDC clássico. 54
Figura 4.4 – Diagrama unifilar para o HVDC clássico 54
Figura 5.1: Sistema HVDC monopolar utilizado nas simulações. 57
Figura 5.2: Harmônicos de tensão no terminal retificador (filtrado). 58
Figura 5.3: Harmônicos de corrente no terminal retificador (filtrado). 59
Figura 5.4: Formas de onda no terminal retificador (filtrado). 59
Figura 5.5: Harmônicos de corrente no terminal retificador (não filtrado). 59
Figura 5.6: Formas de onda no terminal retificador (não filtrado). 60
Figura 5.7: Harmônicos de tensão no terminal inversor (filtrado). 60
Figura 5.8: Harmônicos de corrente no terminal inversor (não filtrado). 60
Figura 5.9: formas de onda no terminal inversor (não filtrado). 61
Figura 5.10: Harmônicos de corrente no terminal inversor (filtrado). 61
Figura 5.11: Formas de onda no terminal inversor (filtrado). 61

Figura 5.12: Tensão DC no terminal retificador. 62
Figura 5.13: Corrente DC no terminal retificador 63
Figura 5.14: Ângulo de disparo do retificador 63
Figura 5.15: Potência ativa filtrada no terminal retificador. 64
Figura 5.16: Potência reativa filtrada no terminal retificador. 64
Figura 5.17: Potência ativa não filtrada no terminal retificador. 65
Figura 5.18: Potência reativa não filtrada no terminal retificador 65
Figura 5.19: Tensão DC no terminal inversor. 66
Figura 5.20: Corrente DC no terminal inversor 66
Figura 5.21: Ângulo de disparo para o inversor 67
Figura 5.22: Potência ativa não filtrada no terminal inversor 67
Figura 5.23: Potência reativa não filtrada no terminal inversor 68
Figura 5.24: Potência ativa filtrada no terminal inversor 68
Figura 5.25: Potência reativa filtrada no terminal inversor 69
Figura 5.26: Tensão DC no terminal retificador. 72
Figura 5.27: Corrente DC no terminal retificador 72
Figura 5.28: Ângulo de disparo do retificador 73
Figura 5.29: Potência ativa filtrada no terminal retificador. 73
Figura 5.30: Potência reativa filtrada no terminal retificador. 74
Figura 5.31: Potência ativa não filtrada no terminal retificador. 74
Figura 5.32: Potência reativa não filtrada no terminal retificador. 75
Figura 5.33: Tensão DC no terminal inversor. 75
Figura 5.34: Corrente DC no terminal inversor. 76
Figura 5.35: Ângulo de disparo no inversor 76
Figura 5.36: Potência ativa não filtrada no terminal inversor. 77
Figura 5.37: Potência reativa não filtrada no terminal inversor. 77
Figura 5.38: Potência ativa filtrada no terminal inversor. 78
Figura 5.39: Potência reativa filtrada no terminal inversor 78
Figura 5.40: Tensão AC na rede de 60Hz. 80
Figura 5.41: Corrente AC na rede de 60Hz 81
Figura 5.42: Tensão AC na rede de 50Hz. 81
Figura 5.43: Corrente AC na rede de 50Hz 82
Figura 5.44: Tensão DC no terminal retificador. 82
Figura 5.45: Corrente DC no terminal retificador. 83

Figura 5.46: Ângulo de disparo no retificador 83
Figura 5.47: Potência ativa filtrada no terminal retificador. 84
Figura 5.48: Potência reativa filtrada no terminal retificador. 84
Figura 5.49: Potência ativa não filtrada no terminal retificador. 85
Figura 5.50: Potência reativa não filtrada no terminal retificador. 85
Figura 5.51: Tensão DC no terminal inversor. 86
Figura 5.52: Corrente DC no terminal inversor. 86
Figura 5.53: Ângulo de disparo no inversor. 87
Figura 5.54: Potência ativa não filtrada no terminal inversor. 87
Figura 5.55: Potência reativa não filtrada no terminal inversor. 88
Figura 5.56: Potência ativa filtrada no terminal inversor. 88
Figura 5.57: Potência reativa filtrada no terminal inversor. 89
Figura 5.58: Tensão DC no terminal retificador com SVC. 90
Figura 5.59: Corrente DC no terminal retificador com SVC. 90
Figura 5.60: Ângulo de disparo no retificador com SVC. 91
Figura 5.61: Potência ativa filtrada no terminal retificador com SVC. 91
Figura 5.62: Potência reativa filtrada no terminal retificador com SVC. 92
Figura 5.63: Potência ativa não filtrada no terminal retificador com SVC. 92
Figura 5.64: Potência reativa não filtrada no terminal retificador com SVC. 93
Figura 5.65: Tensão DC no terminal inversor com SVC. 93
Figura 5.66: Corrente DC no terminal inversor com SVC. 94
Figura 5.67: Ângulo de disparo no inversor com SVC. 94
Figura 5.68: Potência ativa não filtrada no terminal inversor com SVC. 95
Figura 5.69: Potência reativa não filtrada no terminal inversor com SVC. 95
Figura 5.70: Potência ativa filtrada no terminal inversor com SVC. 96
Figura 5.71: Potência reativa filtrada no terminal inversor com SVC. 96
Figura 5.72: Tensão DC no terminal retificador com SVC. 99
Figura 5.73: Corrente DC no terminal retificador com SVC. 99
Figura 5.74: Ângulo de disparo no retificador com SVC. 100
Figura 5.75: Potência ativa filtrada no terminal retificador com SVC. 100
Figura 5.76: Potência reativa filtrada no terminal retificador com SVC. 101
Figura 5.77: Potência ativa não filtrada no terminal retificador com SVC. 101
Figura 5.78: Potência reativa não filtrada no terminal retificador com SVC. 102
Figura 5.79: Tensão DC no terminal inversor com SVC. 102

Figura 5.80: Corrente DC no terminal inversor com SVC. 103
Figura 5.81: Ângulo de disparo no inversor com SVC. 103
Figura 5.82: Potência ativa não filtrada no terminal inversor com SVC. 104
Figura 5.83: Potência reativa não filtrada no terminal inversor com SVC. 104
Figura 5.84: Potência ativa filtrada no terminal inversor com SVC. 105
Figura 5.85: Potência reativa filtrada no terminal inversor com SVC. 105
Figura 5.86: Tensão AC na rede de 60Hz com SVC. 107
Figura 5.87: Corrente AC na rede de 60Hz com SVC. 108
Figura 5.88: Tensão AC na rede de 50Hz com SVC. 108
Figura 5.89: Corrente AC na rede de 50Hz com SVC. 109
Figura 5.90: Tensão DC no terminal retificador com SVC. 109
Figura 5.91: Corrente DC no terminal retificador com SVC. 110
Figura 5.92: Ângulo de disparo no retificador com SVC. 110
Figura 5.93: Potência ativa filtrada no terminal retificador com SVC. 111
Figura 5.94: Potência reativa filtrada no terminal retificador com SVC. 111
Figura 5.95: Potência ativa não filtrada no terminal retificador com SVC. 112
Figura 5.96: Potência reativa não filtrada no terminal retificador com SVC. 112
Figura 5.97: Tensão DC no terminal inversor com SVC. 113
Figura 5.98: Corrente DC no terminal inversor com SVC. 113
Figura 5.99: Ângulo de disparo no inversor com SVC. 114
Figura 5.100: Potência ativa não filtrada no terminal inversor com SVC. 114
Figura 5.101: Potência reativa não filtrada no terminal inversor com SVC. 115
Figura 5.102: Potência ativa filtrada no terminal inversor com SVC. 115
Figura 5.103: Potência reativa filtrada no terminal inversor com SVC. 116

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Grandezas medidas (simuladas pelo MATLAB) e calculadas (modelo clássico) para o terminal retificador, operação nominal, @ 2s, @ 3.4s, @ 3.8s e 60Hz.70

Tabela 5.2: Grandezas medidas (simuladas pelo MATLAB) e calculadas (modelo clássico) para o terminal inversor, operação nominal, @ 2s, @ 3.4s, @ 3.8s e 50Hz....71

Tabela 5.3: Grandezas medidas (simuladas pelo MATLAB) e calculadas (modelo clássico) para o terminal retificador, corrente reduzida, @ 5.4s, @ 5.8s e 60Hz. 79

Tabela 5.4: Grandezas medidas (simuladas pelo MATLAB) e calculadas (modelo clássico) para o terminal inversor, corrente reduzida, @ 5.4s, @ 5.8s e 50Hz.....79

Tabela 5.5: Grandezas medidas (simuladas pelo MATLAB) e calculadas (modelo clássico) para o terminal retificador com SVC, operação nominal, com SVC, @ 2s, @ 3.4s, @ 3.8s e 60Hz. 97

Tabela 5.6: Grandezas medidas (simuladas pelo MATLAB) e calculadas (modelo clássico)npara o terminal inversor com SVC , operação nominal, com SVC, @ 2s, @3.4s, @ 3.8s e 50Hz.....98

Tabela 5.7: Grandezas medidas (simuladas pelo MATLAB) e calculadas (modelo clássico) para o terminal retificador com SVC, corrente reduzida, com SVC, @ 5.4s, @ 5.8s e 60Hz.....106

Tabela 5.8: Grandezas medidas (simuladas pelo MATLAB) e calculadas (modelo clçássico) para o terminal inversor com SVC, corrente reduzida, com SVC, @ 5.4s, @ 5.8s e 50Hz.....106

LISTA DE SIGLAS

AC	Corrente alternada
DC	*Direct Current*
CCC	Conversor Comutado a Capacitores
CFC	*Converter firing control*
CIGRE HVDC	Modelo de linha HVDC
DMPC	*Dynamic maximum power curve*
EMTDC	*Electromagnetic Transients including DC*
EPRI	*Electric Power Research Institute*
ESCR	*Equivalent short circuit ratio*
FACTS	*Flexible Alternating Current Transmission System*
FPO	Fluxo de potência ótimo
GUPFC	*Generalized Unified Power Flow Controller*
HVAC	*High Voltage Alternating Current*
HVDC	*High Voltage Direct Current*
HVDC-Light	Sistema modelo de HVDC
HVDC-Plus	O mesmo que HVDC-Light
IGBT	*Insulated Gate Bipolar Transistor*
IPP	*Intermountain Power Project*
LgV	Controlador do conjunto HVDC-VSC
MHLF	*Multiphase Harmonic Load Flow*
M-VSC-HVDC	*Multiterminal Voltage Sourced Converter HVDC*
PAM	*Pulse Amplitude Modulation*
PI	Proporcional integral
PLL	*Phase Locked Loop*
PPC	*Pole power control*
PSASP	*Power System Analysis Software Package*
PSB	*Power System Blockset*
PSCAD	*Power Systems CAD*
PSS/E	*Power System Simulator for Engineering*
PST	*Phase Shifting Transformer*
PWM	*Pulse Width Modulation*
QMPC	*Quasi static maximum power curve*

RPC	Reactive power control
SEP	Sistema elétrico de potência
SIMULINK	Extensão gráfica do MATLAB para modelagem e simulação de sistemas
SPWM	*Sinusoidal Pulse width modulation*
SSO	*Subsynchronous oscillation*
STATCOM	*Static Synchronous Compensator*
SVC	*Static Var Compensator*
TDC	*Tap changer control*
TEF	*Transient Energy Function*
THD	*Total Harmonic Distortion*
TP	Transformador de potencial
TSC	*Thyristor Switched Capacitor*
UPI	*User Program Interface*
VDCOL	*Voltage Dependent Current Order Limit*
VSC	*Voltage Source Converter*

LISTA DE SÍMBOLOS

Y_{S1}, Y_{S2}	Admitâncias série dos STATCOM equivalente
u_R	Ângulo de comutação no lado do retificador
β	Ângulo de disparo do inversor
α_R	Ângulo de disparo do retificador
γ	Ângulo de extinção do inversor
γ_I	Ângulo de extinção do inversor
δ	Ângulo de extinção do retificador
θ_{S1}	Ângulo do fasor tensão na entrada do retificador
θ_{S2}	Ângulo do fasor tensão na saída do inversor
C	Capacitância
g_{CC}	Condutância do elo DC
g_{S1}, g_{S2}	Condutâncias série dos STATCOM equivalente
k_R, k_I	Constantes associadas ao retificador e inversor
R_3	Controle de potência de nível DC
R_1, R_2	Controle de tensão DC no retificador e inversor
I	Corrente
I_{ca}	Corrente alternada
I_{cc}	Corrente contínua
I_{CCR}, I_{CCI}	Corrente de nível DC no lado do retificador e inversor
I_m	Corrente injetada na barra “m”
Φ_R	Defasagem entre a tensão e corrente alternada gerada no retificador
ϕ	Defasagem entre tensão e corrente
d	Eixo direto
q	Eixo em quadratura
Z_{bDC}	Impedância de base de nível DC
Z_{S1}, Z_{S2}	Impedâncias série dos STATCOM equivalente
L	Indutância
α_{Rmin}, α_{Rmax}	Limites mínimo e máximo do ângulo de disparo do retificador
γ_{Imin}, γ_{Imax}	Limites mínimo e máximo do ângulo de extinção do inversor
a_{Rmin}, a_{Rmax}	Limites mínimo e máximo dos Tap’s do transformador

	conversor retificador
a_{Imin}, a_{Imax}	Limites mínimo e máximo dos Tap's do transformador conversor inversor
V_{S1min}, V_{S1max}	Limites mínimo e máximo para V_{S1}
V_{S2min}, V_{S2max}	Limites mínimo e máximo para V_{S2}
N_R, N_I	Neutros do retificador e inversor
n_{pR}, n_{pI}	Número de pontes do retificador e inversor
P_{ca}	Potência ativa alternada
P_{S1}^{esp} , P_{S2}^{esp}	Potência ativa especificada gerada nos conversores
P_k^{ca} , P_k^{cc}	Potência ativa gerada de nível AC e DC
P_{S1}, P_{S2}	Potência ativa gerada nos conversores
P_m	Potência ativa injetada na barra "m"
P_{S1S2}	Potência ativa total
P_{S1S2}^{calc}	Potência ativa total calculada
P_{CC}	Potência do elo DC
P_{DCR}, P_{DCI}	Potência gerada pelo retificador e inversor na linha DC
P_{cc}	Potência no elo DC
Q_k^{ca} , Q_k^{cc}	Potência reativa gerada de nível AC e DC
Q_{S1}, Q_{S2}	Potência reativa gerada nos conversores
Q_m	Potência reativa injetada na barra "m"
Q_{CCR}	Potência reativa no retificador
X_C	Reatância indutiva da fonte
X_{cR}	Reatância indutiva na entrada do conversor
n_R, n_I	Relação de transformação dos transformadores conversores
R	Resistência
R_{CC}	Resistência do elo DC
R_{dc}	Resistência do elo DC
R_{cR}, R_{cI}	Resistências equivalentes do retificador e inversor
b_{S1}, b_{S2}	Susceptâncias série dos STATCOM equivalente
V_{ca}	Tensão alternada
V_{S1}	Tensão alternada na entrada do retificador
V_{S2}	Tensão alternada na saída do inversor

V_{cc}	Tensão contínua
V_d	Tensão contínua na linha DC
V_{bcak}, V_{bCC}	Tensão de base de nível AC e DC
V_{dc}	Tensão de nível DC
V_{dR}, V_{dI}	Tensão de nível DC no retificador e inversor
Vref	Tensão de referência
Vbarra	Tensão na barra
V_{doR}, V_{doI}	Tensão no lado do retificador e inversor
V_{DR1}	Tensão no primeiro polo da saída do retificador
V_{DR2}	Tensão no segundo polo da saída do retificador
Th_1, Th_2	Tiristores
a_{RI}	Valor dos tap's dos transformadores conversores
P_{cc}^{esp}	Valor especificado da potência de nível DC
a_R, a_I	Valores dos tap's do retificador e inversor
ΔP_{S1S2}	Variação da potência ativa total para o cálculo da matriz jacobiana
ΔV_S, ΔX	Variação da tensão e ângulos do método de Newton Raphson
ΔV_k, ΔV_m, ΔV_{S1}	Variações da amplitude do fasor tensão usadas no método de Newton Raphson
$\Delta\theta_k$, $\Delta\theta_m$, $\Delta\theta_{S1}$, $\Delta\theta_{S2}$	Variações de ângulo do fasor tensão usadas no método de Newton Raphson
ΔP_k, ΔP_m, ΔP_{S1}	Variações de potência ativa usadas no método de Newton Raphson
ΔQ_k, ΔQ_m, ΔQ_{S1}	Variações de potência reativa usadas no método de Newton Raphson

ÍNDICE

RESUMO **7**
CAPÍTULO 1 ..... **20**
Introdução **20**
1.1 – Transmissão HVDC **21**
1.2 – Motivação, objetivo e estrutura da dissertação **24**
CAPÍTULO 2 ..... **25**
Revisão Bibliográfica **25**
CAPÍTULO 3 ..... **42**
Componentes de um Sistema HVDC **42**
3.1 – Sistema HVDC monopolar e o HVDC bipolar **42**
3.2 – Capacidade de transmissão **44**
3.3 – Estações Conversoras **45**
3.4 – Tap HVDC **46**
3.5 – Dispositivos FACTS **47**
3.5.1 – SVC (Static Var Compensator) **48**
CAPÍTULO 4 ..... **50**
Fluxo de Potência em Transmissão HVDC **50**
4.1 – Fluxo de potência **50**
4.1.1 – Equações do elo DC para o modelo *VSC-HVDC* **50**
4.1.2 – Modelo de equações para o elo HVDC clássico **53**
CAPÍTULO 5 ..... **57**
Resultados **57**
5.1 Descrição do sistema HVDC monopolar simulado **57**
5.2 Simulação com valores distintos de tensão DC **58**
5.3 Simulação com valores distintos de corrente DC **71**
5.4 Simulação de uma falta AC na rede 50Hz **80**
5.5 Simulação com valores distintos de tensão DC com SVC **89**
5.6 Simulação com valores distintos de corrente DC com SVC **98**
5.7 Simulação de uma falta AC na rede 50Hz com SVC **107**
CAPÍTULO 6 ..... **117**
Conclusão e Desenvolvimentos Futuros **117**
REFERÊNCIAS **119**

CAPÍTULO 1

Introdução

Durante o início da década de 1890, a *Westinghouse Company* [1] tentou introduzir dois valores de frequência padrão para a geração de corrente alternada – 30 e 60Hz. O uso da frequência de 60Hz foi proposto para potência de distribuição geral, pois não atendia bem o Motor de Indução de Tesla, novo na época, mas atendia muito bem aos transformadores, que eram de pequena capacidade.

No início do século XX, usavam-se várias frequências diferentes nos EUA, entre 25 e 140Hz. Como havia várias empresas operando o sistema elétrico surgiu a necessidade de um conversor de frequências para interconectar sistemas operando em duas frequências diferentes. Algumas dessas máquinas permaneceram em uso até a década de 40, quando as companhias conseguiram completar a conversão para 60Hz. A figura 1.1 mostra um conversor de frequência de 40/60Hz em Mechanicville em Nova York.

Figura 1.1 – Um dos dois conversores de frequência de 40/60Hz da estação hidroelétrica de Mechanicville, Nova York [1]

A transmissão em corrente contínua teve seu início em 1897, quando Thomas Edison propôs a implementação do consumo e fornecimento de eletricidade em baixa tensão de nível DC. Nessa época, o padrão de tecnologia para o sistema elétrico das indústrias ainda estava sendo desenvolvido e a competição entre a transmissão em corrente contínua e a corrente alternada, devido ao uso dos transformadores [2] desenvolvidos por George Westinghouse, estava bastante acirrada.

A transmissão AC se mostrou superior em termos de capacidade, confiabilidade e flexibilidade, por isso se tornou a espinha dorsal da demanda elétrica industrial. A transmissão em corrente contínua voltou a ganhar alguma importância somente depois do desenvolvimento da válvula a arco de mercúrio na década de 1930.

Em 1941, foi feito o primeiro contrato com sistema de transmissão HVDC comercial e 60MW foram fornecidos para a cidade de Berlin através de um cabo subterrâneo de 115km de comprimento. Em 1945 esse sistema estava pronto para operação, entretanto, por causa do final da segunda guerra mundial ele foi desmontado e nunca entrou em operação. Somente em 1954 é que o primeiro sistema de transmissão em HVDC (High Voltage Direct current), com 10MW, foi comissionado em Gotland, na Suécia, com a utilização de cabos submarinos.

No início da década de 1970, o advento da válvula a tiristor permitiu o avanço das aplicações do sistema HVDC e considerável melhora na confiabilidade e diminuição nos custos de implementação. Nos dias atuais, a tecnologia do HVDC está bem estabelecida e opera em conjunto com os FACTS, em sistemas AC, que melhora o desempenho da transmissão de energia.

1.1 – Transmissão HVDC

A corrente alternada ao percorrer um condutor gera um campo magnético que tende a reforçar a corrente na superfície e enfraquecê-la no centro. Esse efeito pelicular aumenta as perdas por reduzir a bitola efetiva do cabo. Tal efeito não acontece na transmissão em corrente contínua.

Cabos submarinos e subterrâneos apresentam capacitâncias mais elevadas que cabos aéreos, isso se deve à configuração geométrica dos condutores e ao meio em que se encontram. Como a constante de propagação na linha é diretamente proporcional à capacitância e inversamente proporcional ao comprimento de onda, altas capacitâncias

reduzem o comprimento máximo da linha de transmissão operando com corrente alternada. No caso da transmissão em corrente contínua, o comprimento de onda é infinito com frequência nula.

Até os anos 60 os retificadores usados eram feitos de mercúrio e dos anos 70 em diante o HVDC entrou em uso. O HVDC tem vantagem na transmissão submarina com comprimentos maiores que 30 km por causa da alta capacitância dos cabos isolados. O HVDC possui baixa faixa de servidão e flexibilidade de controle do fluxo de carga.

Na transmissão HVDC, a corrente alternada passa por uma estação retificadora, é transmitida em nível DC no elo DC, que depois passa por uma estação inversora e é distribuída para as cargas em nível AC. A economia de material elétrico é um fator importante para o uso do HVDC. A transmissão HVDC utiliza menos cabos, torres menos volumosas e requerem faixas de servidão mais estreitas, figuras 1.2 e 1.3. A figura 1.4 ilustra qualitativamente a vantagem econômica em função do comprimento da linha de transmissão do uso de HVDC em relação ao HVAC. A partir de uma determinada distância o HVDC torna-se mais viável economicamente.

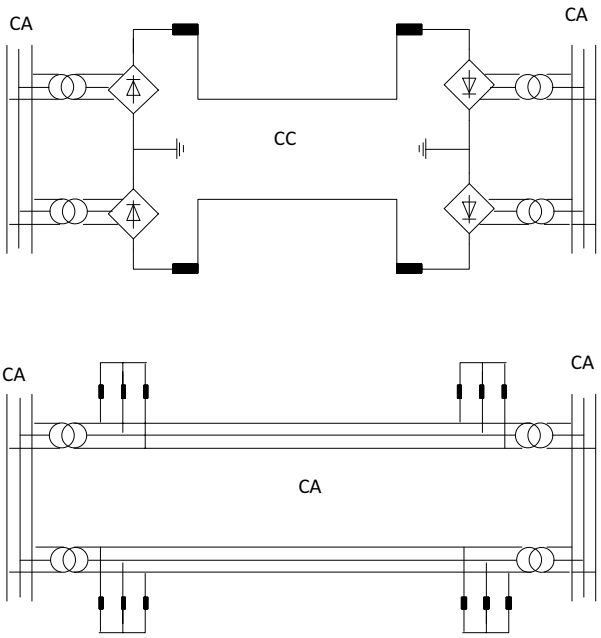

Figura 1.2 – Esquemas de linhas de transmissão para o HVDC e HVAC.

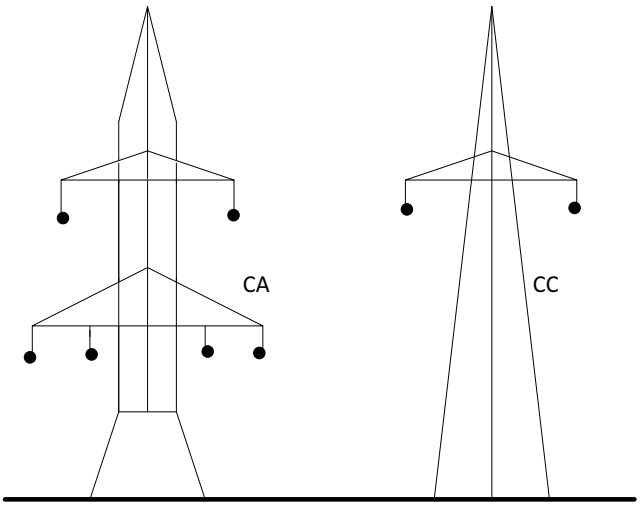

Figura 1.3 – Esquema de torres para o HVAC e HVDC.

A transmissão em pequenas distâncias, quando se usa conversores *back to back*, é vantajosa para o uso de HVDC devido à controlabilidade. Além disso, o uso do HVDC restringe a potência de curto-circuito (rigidez de uma barra em manter os valores de suas variáveis elétricas), ainda permite o fornecimento de potência reativa para linhas longas quando são usados CCC (*Capacitor Commutated Converters*) ou VSC-HVDC (*Voltage Source Converter*), oferecendo menores perdas e níveis mais baixos de campos eletromagnéticos.

Como desvantagem, na transmissão em corrente contínua, injetar ou drenar potência em um ponto intermediário na linha é um processo mais complexo. Uma solução técnica para esse problema é o uso de um Tap HVDC, que permite drenar potência no elo DC, mas nem sempre é uma solução economicamente viável.

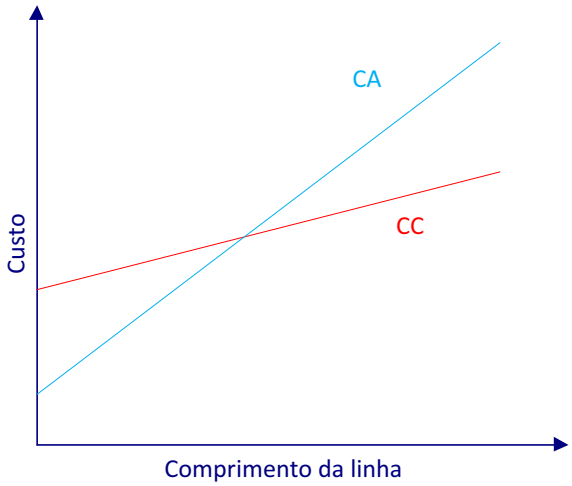

Figura 1.4 – Comparação de linhas de transmissão em HVDC e HVAC para custos em relação à distância.

1.2 – Motivação, objetivo e estrutura da dissertação

O aumento da demanda em um mundo cada vez mais globalizado, e com mais restrições ambientais e técnicas para produção de energia elétrica, requer o aproveitamento de fontes cada vez mais distantes dos centros consumidores e a interligação de sistemas com características técnicas distintas. O sistema HVDC, como mencionado no item 1.1, possui vantagens que se encaixam exatamente nessas necessidades. O aumento da capacidade instalada de sistemas HVDC causa impactos nas condições de operação, tanto estáticas quanto dinâmicas, dos sistemas elétricos.

O objetivo dessa monografia é analisar o comportamento de um *link* HVDC, principalmente em termos de suporte de reativos, tanto na operação em regime permanente quanto em transitórios.

O capítulo 2 consiste no registro da evolução dos trabalhos publicados sobre a transmissão em corrente contínua; o capítulo 3 é dedicado ao estudo das configurações do HVDC e suas características e também é analisado o SVC; no capítulo 4 são apresentadas as equações que regem o modelo HVDC; no capítulo 5 são mostrados os dispositivos, em diagrama de blocos, que são usados nas simulações, assim como os resultados obtidos. Finalmente o capítulo 6 apresenta conclusões sobre este estudo.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica

Alguns modelos de linhas de transmissão em HVDC foram usados a fim de estudar o surgimento de harmônicos na rede. Também estudos de pontes conversoras e modificações nesses dispositivos buscam uma modelagem de harmônicos na tentativa de representá-los através de programas computacionais e diminuírem os seus efeitos que causam perdas e efeitos indesejáveis para a transmissão. Dentre esses efeitos podemos citar erros de medição e perdas de energia, uma vez que os harmônicos alteram a amplitude da tensão ou corrente fundamental medida pelos instrumentos.

Em 1970 um método chamado "*diakoptics*" é usado em uma técnica computacional-digital para determinação da dinâmica de um sistema HVDC, como aquele apresentado em [4]. A flexibilidade deste método permite incluir várias pontes conversoras e inclusão e exclusão de componentes no modelo. A rede elétrica é representada por equações diferenciais de primeira ordem, envolvendo capacitâncias, indutâncias e matrizes com estas variáveis. Como a cada instante as válvulas conversoras alternam seu estado, pelo chaveamento, mudam também as equações que representam o representam e a própria rede. Através da modelagem de matrizes, o método "*diakoptics*" modifica os sistemas matriciais que mudam a cada instante, dessa forma, fica desnecessário inverter as matrizes a cada mudança. Um conjunto de ramos é representado por meio nodal, representando a topologia do conversor. Casos de descontinuidades devido à faltas na válvula conversora são abordados em [4].

Em 1978, Arrillaga, Campos Barros e Al – Khashsli propuseram um modelo de conversor para HVDC em um "esquema de tipo unitário" [5], o qual opera adequadamente na presença ou não de filtros harmônicos para rede em corrente alternada. Tal modelo são conversores conectados com geradores síncronos isolados, nos quais são usadas equações em espaço de estados, envolvendo variáveis elétricas, e soluções numéricas adequadas para computação digital. O gerador, o transformador e conversores são modelados através destas equações. São simulados um caso em operação normal com filtros e outro caso sem filtros, são simulados. De acordo com a análise, os dois casos não apresentaram sinais de instabilidade. Um terceiro caso é simulado, onde o filtro é retirado no segundo ciclo da forma de onda (uma perturbação

súbita) e o resultado mostrou que a ausência de filtro não foi relevante em relação às formas de onda, logo o modelo pode operar satisfatoriamente com ou sem o filtro harmônico.

Um estudo sobre estabilidade dinâmica incluindo HVDC é realizada por Padiyar, Pai e Radhakrishna [6]. Este estudo consiste em uma análise com uma unidade geradora e um elo DC, onde não é necessário reduzir a rede do sistema para eliminar as barras não geradoras, assim como um conjunto de equações envolvendo matrizes pode ser facilmente ajustadas em caso de mudanças na rede. O modelo usa o método de Newton para calcular as equações de fluxo de potência. As equações representam: a máquina síncrona; o controle e excitação do sistema; a unidade geradora; a representação da carga; o controle do conversor e elo DC; a representação da rede; e um modelo de espaço de estados do sistema global. O modelo é dividido em subsistemas e depois interconectado para formar um sistema global. A análise de autovalores divide o estudo em dois casos, o primeiro caso assume o elo DC fora do sistema e o segundo caso, dentro do sistema. Ainda para cada caso são analisadas três situações. O efeito da saliência dos geradores e o amortecimento das oscilações eletromecânicas são analisados em cada situação. Enfim, abordou-se o desempenho entre a interação AC-DC, do sistema global, e entre o controle de máquinas e o controle do elo DC.

Vovos, Galanos e Giannakopoulos [7] usam a técnica de tensores para reduzir o esforço computacional de uma modelagem matemática para sistemas HVDC. A técnica também é usada para simular faltas nas linhas e barras. Um método de simulação digital é empregado para a análise AC-DC, tanto para estudo de estabilidade transitória como injeção de harmônicos ou outra aplicação que requeira o cálculo de valores instantâneos para as variáveis de estado do sistema. O elo DC é modelado por técnica de grafos e um conjunto de equações matriciais. Os filtros e cargas estáticas são representados por equações diferenciais. O circuito de proteção é representado por uma resistência que aumenta com o tempo. As máquinas síncronas são representadas por equações diferenciais. O sistema de controle de frequência e potência, e o controle de tensão e potência reativa são modelados. O sistema de transmissão é representado por um diagrama de grafos e por equações matriciais, e as linhas paralelas duplas, assim como os barramentos, são representadas por um conjunto de equações matriciais. Um diagrama de simulação é mostrado (fluxograma) na figura 10, onde dois casos são analisados. A simulação é uma falta monofásica localizada a 50 km da barra do inversor. O transitório da falta para a tensão de comutação da barra retificadora, para o

ângulo de disparo dos conversores e para a tensão DC através da ponte inversora são analisados. Desse modo, todos os tipos de faltas no conversor, faltas nos barramentos e linha, desbalanços, mudanças de carga, chaveamento, e circuito de proteção podem ser simulados com o uso da técnica de tensor.

Em [8] é feita uma modelagem de equações de estado discretizadas para variáveis com diversas constantes de tempo, usando o método de estado médio (*state-averaging*). Como existem constantes de tempo puras no modelo, sem coeficientes, essas equações não podem ser usadas diretamente para a análise de estabilidade e é necessário o uso do método "*state-averaging*"e uma modelagem matricial é feita. O critério de Routh é usado para a análise da estabilidade. As variáveis são estudadas quanto sua influência na estabilidade do sistema HVDC.

Os autores Ni e Fouad [9] propõem um modelo DC válido para o começo das oscilações transitórias para a análise de estabilidade. Os autores usam um método TEF (*Transient Energy Function*) modificado, para representar o efeito do sistema HVDC de dois terminais, e o modelo inclui o conversor, a linha DC e o VDCOL (*Voltage Dependent Current Order Limit*) e as dinâmicas de controle DC interno são desprezadas. O sistema HVDC é modelado para dois terminais e estratégias são adotadas para o modo de controle DC. O TEF é desenvolvido e modelado através de uma série de equações envolvendo grandezas como: potência mecânica e elétrica, constante de inércia do rotor, barras, ângulos, etc. O trabalho adota um procedimento de seis passos para o estudo da estabilidade semelhante para o sistema AC. Dois sistemas são simulados, cada um sofre uma perturbação com uma falta trifásica em uma de suas barras. Os resultados comprovaram boa concordância da simulação (simulador EPRI) com o modelo proposto.

Um estudo é feito sobre modelos de sistema HVDC em [10], onde o primeiro modelo usado desde os anos 60 representa os efeitos eletromagnéticos da transmissão em corrente contínua e a dinâmica da alta frequência dos controles de pólos. O segundo modelo, chamado pelo autor de "regime permanente falso", fornece resultados aceitáveis somente quando a dinâmica muda vagarosamente. No trabalho é proposto um terceiro modelo, pelo fato de o primeiro ser caro (modelagem) e ser necessário o uso de pequenos passos de tempo de integração, e o segundo representa dinâmicas válidas apenas para regime permanente. Esse terceiro modelo é semelhante ao segundo, porém não possui alta velocidade de controle do HVDC e dinâmica L/R como no segundo, e por isso pode ser usado passos de tempo normal de integração relacionado com cálculos

de estabilidade. Na realidade esse terceiro modelo é o mesmo que o segundo, com a diferença de que nem o ângulo de disparo do retificador e nem do inversor possuem limites ou controle de tensão.

Em 1989 um modelo de conversor é proposto em [11]. De acordo com esse artigo, um conversor de 3 pulsos é elaborado a fim de analisar efeitos harmônicos na linha de transmissão em corrente contínua. O modelo tenta superar algumas falhas do conversor clássico no que diz respeito à analise e representação do espectro harmônico em novos sistemas HVDC. O artigo propõe o uso de uma capacitância de acoplamento entre as válvulas conversoras e a terra nos transformadores conversores. Com essas propostas, os harmônicos de ordem [3(2n+1)] e a corrente que flui para a terra pelo eletrodo da linha HVDC ficam bem representados e explícitos através do conversor de 3 pulsos, o que é deficiente no modelo de conversor clássico, além disso um filtro DC no sistema IPP (*Intermountain Power Project*) produz ruídos (através de mudanças no circuito da parte DC) por tensões induzidas, que ficam bem representados no modelo de 3 pulsos.

De acordo com [12] existem duas diferentes fontes de ruídos principais em sistemas HVDC. A primeira é o efeito corona, semelhante no sistema AC e a segunda é a interferência gerada por conversores. O ruído por conversores é gerado principalmente por rápida queda de tensão através da válvula conversora durante a ignição, e pode causar interferência pela radiação eletromagnética proveniente das válvulas conversoras. A corrente de ruído sobre a linha DC pode interferir na potência e linhas de telecomunicação pelo acoplamento magnético e elétrico. Estudo é feito para a tensão induzida devido ao ruído que, gerado pelas estações conversoras é atenuado pelas perdas por propagação e transposição da linha.

Resultados mostraram que o nível de ruído na linha DC apresenta uma dependência muito grande com a frequência devido às reflexões da corrente de ruído nas estações conversoras e o local do eletrodo de aterramento. Os resultados também mostraram que a dependência com a frequência é mais acentuada para a corrente de ruído no caso HVDC bipolar do que no caso HVDC monopolar.

Em [13] é proposto uma nova análise, através de um novo modelo para fluxo de corrente harmônica DC em sistemas HVDC. Este visa calcular harmônicos de ordem tripla e harmônicos característicos (12 pulsos). O modelo clássico não representa bem tais harmônicos, por não ter um caminho adequado da corrente para a terra formada por capacitores, dessa forma o modelo proposto inclui essas capacitâncias e prevê esses

harmônicos de corrente de ordem tripla, pares e ímpares, para a análise de condições balanceada e desbalanceada, para caso bipolar e monopolar do HVDC. Tais harmônicos podem causar interferência em sistemas de comunicações próximos. Em muitos casos a adição da capacitância ainda é insuficiente e é necessário o uso de um filtro sintonizado para eliminar os harmônicos de ordem tripla.

Um modelo de um conversor trifásico para HVDC foi proposto em 1994 por [14]. O trabalho consistiu em analisar o fluxo de potência gerado por harmônicos e investigar distorções não características e não comuns provenientes de sistemas de HVDC. A validação do modelo é feita comparando a simulação do modelo com testes de campo. São investigadas interações harmônicas entre o HVDC e o SVC (MHLF – *Multiphase Harmonic Load Flow*), devido ao acoplamento desse dispositivo FACTS (*Static Var Compensator*), também fonte de harmônicos, em uma subestação próxima ao circuito HVDC.

No modelo proposto, através de uma função de chaveamento aproximada em diferentes intervalos de tempo para a corrente do lado DC, são determinados os harmônicos (fasores) ao lado de corrente alternada diretamente dos fasores (harmônicos) ao lado de corrente contínua. O circuito é analisado com e sem superposição (causada pelas indutâncias características do lado AC e assim havendo um atraso da extinção da corrente). Dessa forma o modelo equivalente do circuito é a combinação do circuito sem e com superposição da corrente.

Uma análise entre a forte interação entre geradores e conversores fica explícita em [15]. Uma solução no domínio harmônico para uma unidade representada por um gerador, conversor (retificador de 12 pulsos) e um sistema DC com interação harmônica é proposta. O conversor clássico não é capaz de representar bem o acoplamento de frequência, causado pela saliência do rotor na presença de correntes desbalanceadas ou distorcidas, dessa maneira, no sistema, a saliência do gerador é representada por uma matriz de impedâncias acopladas por harmônicos. A saturação magnética no transformador causa correntes harmônicas de baixa ordem e isso é levado em consideração no modelo. Um conjunto de equações (usando o método de Newton) é usado para representar a operação do conversor, a interação entre o gerador e o conversor e a interação entre os conversores e o sistema DC. Também são modelados os efeitos de variação nos ângulos de disparo e comutação causados por harmônicos de tensão alternada e corrente DC. O controle de potência reativa é analisado na ausência de um transformador conversor, desse modo, o controle é feito por excitação,

controlando o nível interno da força eletromotriz de sequência positiva e fundamental, enfim é comparada a simulação no domínio do tempo (necessário o uso de um capacitor *snubber* através de cada tiristor para melhorar a estabilidade numérica) e no domínio harmônico (através de equações e resolvido pelo método de Newton).

Simulações no domínio do tempo e utilização de autovalores para dois modelos chamados de "*response model*" e "*detailed model*" são apresentadas em [16]. O objetivo desses é diminuir o tempo de simulação com o uso de dinâmicas rápidas (*fast dynamics*), o que o é feito com sucesso através do estudo de equações representando componentes e variáveis rápidas (*fast*) e lentas (*slow*). O diagrama de controle dos dois modelos é parecido, mas o "*detailed model*" difere do "*response model*" por incluir as dinâmicas de controle de pólos e ponte (*bridge*). O novo modelo (redução de escala de dois tempos), derivado do "*detailed model*", foi inserido na literatura e tal modelo combina a precisão do "*detailed model*" e a eficiência do "*response model*".

A tentativa de estimar tensões causadas por relâmpagos e surtos atmosféricos em sistemas HVDC foi realizada em 1999 de acordo com [17]. Essas tensões são analisadas em caso de descargas elétricas em linhas de transmissão DC em que são estudados os processos de iniciação e propagação de corrente em caso de ambientes úmidos, efeitos das gotas de chuva (condutividade e descargas devido a sua desintegração) e seu comportamento com o campo elétrico, influência da condutividade em condições chuvosas e variação da tensão de descargas elétricas com a altitude. Essas simulações foram uma forma de prever a tensão crítica em caso de descargas atmosféricas. Para a análise, são levados em consideração às condições de iniciação, propagação e sustento do relâmpago e um procedimento é usado para se determinar a tensão crítica da descarga atmosférica, além da influência da altitude, pressão atmosférica e o tamanho das gotas de chuva.

A modelagem analítica de um HVDC/HVAC é feita em [18] onde este é dividido em 3 subsistemas: AC, PLL e DC, onde são verificadas as interações entre os sistemas HVDC e HVAC para pequenos sinais. O PLL (*Phase Locked Loop*) é um sistema de realimentação em que força a frequência de saída ser igual à frequência de entrada. A representação em espaço de estados é usada para uma representação em variáveis contínuas, onde o estudo mostra que nem sempre são necessários a discretização do modelo, e a interação entre esses 3 subsistemas ficam explícitas. Não são representados os efeitos eletromecânicos e dinâmicos das máquinas. Os sistemas AC e DC são modelados juntos na mesma frequência através da transformação de *Park*.

Phase Locked Loop é analisado em relação ao seu ganho com retificador e inversor no amortecimento das oscilações na corrente DC e AC. A interação entre as variáveis DC e AC são estudadas e a interação entre os subsistemas são representadas por uma matriz. Os autovalores são decompostos para uma análise de cada subsistema e depois do sistema como um todo. Eles são movidos de acordo com o aumento do ganho do PLL no lado do retificador (autovalores se movem mais para a esquerda do semi-plano esquerdo) e no lado do inversor (autovalores se movem mais para a direita do semi-plano esquerdo) e isso influencia em um aumento da estabilidade e diminuição das oscilações apesar do caso do lado do inversor deteriorar um pouco a estabilidade. Enfim o modelo tem a vantagem de ser facilmente usado para análises sistemáticas, interações e controles do sistema AC e DC e a influência de parâmetros em alguns sistemas sobre o desempenho do proposto modelo.

Em [19] é mostrado que o método de Newton completo (*full Newton*) pode ser usado para a análise de parâmetros em HVDC, através de uma matriz Jacobiana, como controlador de corrente DC pelo retificador (ângulo de disparo), controle do ângulo de extinção no inversor (tensão DC), controle de comutação de tap em transformadores e controle de transferência de potência ativa. A modelagem é feita no domínio da frequência (harmônicos). A solução das variáveis conversoras é feita simultaneamente, uma vez que os conversores interagem não linearmente um com o outro no elo DC.

A matriz jacobiana (CIGRE HVDC) representa blocos, que são submatrizes, que ligam elementos tais como barras, cujos blocos são nulos se não houver acoplamentos entre tais elementos, por exemplo, os dois sistemas AC, que são separados pelo elo DC. O circuito utilizado é o modelo "*benchmark CIGRE HVDC*" (na seção 4.1.2 desta tese é mostrado esse modelo que será usado para a análise de resultados) onde a análise harmônica é feita em relação à corrente (fase A) no lado do retificador e tensão DC no lado do inversor. O referido trabalho mostra uma extensão (interações não lineares entre os conversores), uma vez que pesquisas na literatura têm sido limitadas apenas às interações lineares entre sistemas DC e AC.

O impacto em sistemas HVDC de modelagem de sistemas dinâmicos, como aquele feito em [20], é estudado pelos autores Aik e Andersson. O modelo de Quasi-Estático de Curva de Potência Máxima (QMPC) é estudado através de simulações no domínio do tempo e análise matemática, assim como a Dinâmica de Curva de Potência Máxima (DMPC).

O modelo QMPC possui a hipótese que o equivalente Thévenin (fonte de tensão alternada) permanece constante em amplitude e no caso DMPC, as dinâmicas de controle de tensão no lado alternado do inversor são representados por uma máquina síncrona conectada à barra do equivalente Thévenin. A análise é feita sobre o lado do inversor.

Nos dois modelos, a potência DC é função da corrente DC, porém no caso QMPC, essa potência é obtida primeiramente calculando a tensão alternada do equivalente Thévenin (amplitude), enquanto no caso DMPC, a potência é obtida através de um programa com dinâmica de simulações no domínio do tempo. Uma análise quantitativa e qualitativa é feita. Assim, quantitativamente a corrente DC é aumentada ou diminuída de forma vagarosa ou rápida e as curvas de potência máxima são avaliadas graficamente. Qualitativamente, as dinâmicas dos subsistemas do DMPC são excluídas uma a uma até se igualar ao QMPC, e ser avaliada a curva de potência máxima, dinâmicas como tensão rotórica e de campo, sistema eletromecânico do rotor, fluxos do eixo *d* e *q*, etc. Alguns parâmetros são avaliados, como excitação, máquinas síncronas e razão de curto circuito efetivo (ESCR), para a sensibilidade da dinâmica dos sistemas com os efeitos desses parâmetros.

De acordo com os autores Bathurst, Watson e Arrillaga [21], uma linha bipolar pode apresentar efeitos de acoplamento entre os dois pólos. Uma solução é feita com o uso do algoritmo de Newton unificado, no domínio da frequência para mostrar tal fato. Dessa forma, um circuito monopolar é dividido em dois pólos, reduzindo a potência de base e a corrente DC média à metade.

Uma comparação é feita entre o circuito monopolar e o circuito bipolar (derivado do monopolar por ser dividido em dois circuitos). Um efeito de ressonância pode aparecer e pode surgir uma corrente harmônica elevada entre os conversores. Um efeito desse acoplamento mútuo também pode ser uma alteração na tensão DC harmônica, porém nos harmônicos de corrente alternada esse efeito é pequeno, mesmo sob condições desbalanceadas. Os reatores de alisamento podem alterar a frequência (ressonância) e consequentemente a impedância própria. Isso é bem detalhado em [21], onde são mostrados os efeitos e diferenças nos parâmetros citados anteriormente, comparando a linha bipolar (derivada do monopolar) com uma monopolar. Para uma análise do sistema de corrente alternada, uma versão monopolar do elo DC bipolar seria mais conveniente.

O impacto de geradores, turbinas e ondulações da corrente DC no caso HVDC sobre o momento torsor em geradores é feito em [22]. É feito um estudo exemplar com uma linha assíncrona e bipolar (Lituânia e Polônia) e uma linha assíncrona e monopolar (Polônia e Suécia). São usados dois modelos, o reduzido (1d, 1q) e o detalhado (2d, 3q).

Uma falta trifásica e simétrica é aplicada no lado da barra inversora e estudos sobre o fator de escala e corrente de falta são analisados, além de períodos de pico de energia (inverno) e condição de mínima carga (verão), estudando os casos mais arriscados de geradores conectados às barras, em relação às vibrações de momentos torsores. Segundo [22], a amplitude de vibração do momento torsor no eixo devido à excitação ressonante do conjunto gerador – turbina é dada pelo produto da taxa de aumento na amplitude de vibração no instante que a excitação do torque é aplicada pela constante de tempo de decaimento da vibração. Esse estudo demonstra que a constante de tempo de decaimento para momentos torsores é elevada com o aumento da resistência do sistema, ou seja, um fator de potência mais adiantado aumenta essa constante de tempo de decaimento.

Os autores Wood, Hume e Osauskas [23]propõem um modelo de conversor. Tal modelo (6 pulsos e ponte de Graetz) pode ser não linear quando representado no domínio do tempo, mas apresenta características aproximadamente lineares quando representado no domínio da frequência. Um conjunto de equações algébricas é formulado para representar a transferência de distorção da tensão AC, corrente DC e modulação do ângulo de disparo em direção à corrente AC e tensão DC. Assim o modelo de conversor pode ser linearmente acoplado a outros componentes como sistemas e controladores AC/DC para uma análise completa do sistema HVDC, sendo as entradas: a tensão AC, a corrente DC e o ângulo de disparo. Essas variáveis são divididas em dois grupos: componente de base e de distorção. As variáveis AC são representadas somente por suas sequências positiva e negativa, uma vez que a componente de sequência zero não interage com o conversor. As componentes de base representam aquelas em que a transferência de distorção pelo conversor é linearizada e as componentes de distorção, aquelas com harmônicos com múltiplos, em geral não inteiros. Como resultado, tem-se que a mudança nas formas de onda do conversor, devido às distorções harmônicas, é resultado de dois diferentes mecanismos de transferência de distorção. O primeiro corresponde às mudanças nas formas de onda durante os inalterados períodos de condução e o segundo é associado às inalteradas formas de onda durante as mudanças dos períodos de condução.

Um estudo sobre um conversor é feito em [24] pelos pesquisadores Wood, Osauskas e Hume. São descritas duas aplicações do modelo, a primeira para o cálculo dos níveis harmônicos em regime permanente na presença de sistemas desequilibrados e a segunda aplicação é para o cálculo das dinâmicas do sistema HVDC dentro de um intervalo de frequência de 2 a 200 Hz. Tal modelo de conversor sob condições desbalanceadas ou de distorção tem suas formas de onda alteradas e os instantes de chaveamento também mudam e esses efeitos são aplicados para duas configurações de cálculo: condução direta e comutação. A solução é dividida em três partes: a primeira é a solução em regime permanente; a segunda é a solução transitória e a terceira é a linearização da relação entre a variação do instante de chaveamento e a distorção aplicada, essa terceira resultando na modulação PAM (*Pulse Amplitude Modulation*).

A primeira aplicação é modelada uma matriz de acoplamento entre frequências, onde essas frequências são relacionadas entre si e uma frequência única pode gerar uma série de outras frequências relacionadas linearmente com essa frequência fundamental. Uma matriz de admitâncias representando a relação entre cada conversor com o sistema alternado e o elo DC é modelada através da equação de Larson que usa uma análise nodal. Um tensor (matriz 2x2) é usado para facilitar o cálculo contendo variáveis conhecidas e desconhecidas. Assim, para a primeira aplicação, um efeito de 2% de distorção de tensão de sequência negativa nos terminais do retificador é analisado sobre a corrente alternada no domínio da frequência.

Para a segunda aplicação é analisada a dinâmica de modelagem de nove subsistemas, sob o intervalo de frequência em estudo: sistema AC do retificador e inversor, filtros AC do retificador e do inversor e capacitores shunts, sistema DC, conversores do retificador e inversor do sistema HVDC, e por fim O PLL do retificador e inversor. Todas as simulações no domínio da frequência apresentam boa concordância com o domínio do tempo (PSCAD/EMTDC).

Em [25] é realizado um estudo de aplicação de VSC (*Voltage Source Converters*) em sistemas HVDC. Análises de propagação de harmônicos, previsão de casos de ressonância e análise de estabilidade são feitos em [25]. A série de Fourier é usada para a modelagem harmônica. Um modelo de SVC é apresentado e uma técnica PWM simula o chaveamento dos dispositivos eletrônicos. Equações representam a operação de regime permanente, modelagem harmônica em regime permanente e controle de ângulo de fase do SVC. Estudos são feitos sobre a troca de potência ativa entre o sistema AC e DC e a troca de potência reativa entre o sistema AC e o VSC. Um

sistema é modelado representando a operação do VSC, onde dois desses dispositivos, o primeiro como função de um despachante de potência e o segundo como função de um regulador de tensão DC mestre atuam no sistema. O primeiro fornece uma demanda de potência ativa pré-especificada e o segundo tem a função de manter a tensão DC em um valor constante adequado. Também é analisada a impedância no lado DC, a potência injetada por cada conversor de fonte de tensão e a corrente e sua análise em algumas ordens harmônicas e interação com o sistema DC, produzindo ressonância, para diferentes comprimentos de cabos. Enfim, as análises de modelagem possuem grande concordância com simulações com o PSCAD/EMTCD no domínio do tempo. Isso demonstra o importante crescimento do uso de dispositivos como VSC em sistemas elétricos.

De acordo com os autores Osauskas e Wood [26], uma modelagem em espaço de estados pode ser feita para um sistema monopolar HVDC inclusive dispositivos FACTS. O modelo pode ser escrito na forma de admitâncias e impedâncias, onde o primeiro tem a corrente como saída e a tensão como entrada e o segundo, a tensão como saída e a corrente como entrada. A modelagem pode ser dividida em vários subsistemas individuais de modelos de estado lineares em que os subsistemas podem ser interconectados. Os nove subsistemas são: os sistemas AC do retificador e inversor; filtros AC do retificador e inversor; capacitores shunt; o sistema DC; os conversores do lado do retificador e inversor, e o PLL do retificador e inversor.

Um estudo dessa proposta é efetuada no intervalo de 2 a 200Hz no lado DC. Na modelagem do conversor, a componente de sequência zero do sistema alternado é desprezada, por não ser gerada e nem afetar os dispositivos eletrônicos do sistema. Assim a corrente DC no lado do retificador pode ser analisada e determinada através dos subsistemas.

Inter-harmônicos são distorções de frequências múltiplas não inteiras da fundamental. Também os inter-harmônicos são estudados e uma forma de prevê-los é feita em [27]. Os inter-harmônicos são resultantes das características de cada conversor e também resultantes da distorção de frequências da parte DC e AC do sistema. O desbalanço no sistema HVDC, quando assíncrono resulta na produção de inter-harmônicos. Esses efeitos podem ser descritos em uma matriz de acoplamento de frequências no domínio da frequência segundo os autores Hume, Wood e Osauskas [27]. O elo DC é modelado através de representação de admitâncias referidas ao retificador e inversor. Uma matriz de acoplamento é modelada para representar as

relações entre o sistema AC e DC, sendo que a diferença da frequência dos dois conversores é multiplicada pelo número de pulsos do elo DC. Desse modo dois casos são analisados: um *back to back* (elo DC) 50/60Hz e um 50/51Hz, sendo duas áreas de frequências distintas.

Cada caso descrito acima se divide em dois estudos, o primeiro sendo os inter-harmônicos produzidos em operação normal e o segundo, os inter-harmônicos produzidos devido a um desbalanço de sequência negativa. No primeiro caso, o desbalanço é inserido no retificador (50Hz) com resposta (sequência negativa) no inversor (60Hz) e vice-versa. No segundo caso, a sequência negativa é inserida no retificador (50Hz) com resposta no lado do inversor (51Hz) e vice-versa. Também são discutidas as oscilações no eixo do rotor do conjunto turbina-gerador, devido os inter-harmônicos.

O uso de dispositivos FACTS é também enfatizado com o autor Zhang [28]. As modelagens trabalham em um sistema com três conversores, onde os dois conversores conectados a segunda e terceira barras são chamados de primário, enquanto o terceiro conversor conectado à primeira barra é considerado como secundário. Uma simulação divide o sistema HVDC em dois modelos, o primeiro admite todos os conversores coalocados na mesma subestação, enquanto o segundo é um esquema com a incorporação da rede DC.

A respeito das duas modelagens, vale ressaltar que no primeiro modelo, o M-VSC-HVDC (*Multiterminal Voltage Sourced Converter HVDC*) é analisado através de um conjunto de equações de potência e tensão com restrições que mostram o controle (tipo PQ e tipo PV) da tensão e potência em tal dispositivo, através do método de Newton para o fluxo de potência. Comparações entre o modelo M-VSC – HVDC com o dispositivo GUPFC (*Generalized Unified Power Flow Controller*) são feitas. Em relação ao segundo modelo, o equipamento M-SVC-HVDC é estudado com a inserção do conjunto de equações para o elo DC que se torna explícito (incorporação do elo DC) e analisado o algoritmo de Newton para o fluxo de potência. Demonstrações revelam que, para ambos os modelos, o conversor primário pode usar tanto o modo PQ como PV e o conversor secundário fornece o controle da tensão. É demonstrado que o M-VSC – HVDC, em relação ao GUPFC, tem uma forte capacidade de controle, tanto para as potências reativa e ativa (modo de controle PQ) como para a tensão (modo de controle PV).

Um teste sobre a modelagem dinâmica dos conversores do elo DC, como em [29], fica explícito com a comparação entre um modelo proposto e um modelo "*quasi-steady*" para o caso SSO (*subsynchronous oscillation*) e um caso de estudo para autovalores em alta frequência. O modelo usa dois passos: primeiro o circuito HVDC principal é dividido em duas partes (lado do retificador e lado do inversor, com um capacitor central), e segundo o lado do retificador e o lado do inversor são modelados através de dois conjuntos de equações de estados, para cada conversor e depois a equação de estados do capacitor central é inserida. O modelo é validado através da comparação com a simulação no domínio do tempo (*detailed model*) através do software PSCAD/EMTDC. No primeiro caso, os autovalores são muito próximos, mostrando que o modelo desenvolvido está muito próximo do modelo "*quasi-steady*" (autovalores obtidos com variação do ângulo de disparo do retificador). No segundo caso em estudo, o impacto do controle dos parâmetros da corrente DC do retificador sobre a estabilidade em alta frequência, é mostrado que um aumento do ganho do controlador (PI) da corrente DC do retificador resulta em instabilidade e oscilações em alta frequência, análise feita com os autovalores através do método do lugar das raízes.

Um modelo de elo DC baseado em VSC é modelado em [30]. Este é composto de duas estações conversoras conectadas por um cabo DC. Um SVC controla a tensão da barra DC e o outro controla o fluxo de potência na linha DC. Com relação ao balanço de potência ativa, um dos conversores atua como controlador de tensão DC e o outro, como controlador de potência ativa.

Oito casos foram estudados, dos quais os quatro primeiros têm o primeiro VSC operando como retificador e o segundo VSC operando como inversor, e vice-versa para os outros quatro casos. Como consequência é realizado um estudo de um problema de otimização e um algoritmo para o mesmo. A análise de autovalores revela, através de linearização do sistema, que o controle de tensão melhora o amortecimento das oscilações, quando o primeiro VSC opera como retificador, e reduz o amortecimento das oscilações quando o mesmo VSC opera como inversor. Na simulação transitória, dois modelos são analisados: o modelo D-Q e o modelo trifásico para o VSC; e o ângulo rotórico e potência no primeiro VSC, para uma falta trifásica, mostram resultados parecidos para os dois modelos. A conclusão revela que o ganho do controlador depende da localização do controlador de tensão DC e o modelo D-Q é bem útil para prever o desempenho do sistema.

Em 2006 uma simulação do primeiro modelo *CIGRÉ HVDC* é realizada nos softwares PSCAD/EMTDC, PSB/SIMULINK e uma terceira simulação com uma interface entre esses aplicativos (PSCAD – SIMULINK). Isso é explicado pelos autores Faruque, Zhang e Dinavahi [31]. O primeiro sistema *benchmark CIGRÉ HVDC* é modelado e simulado. A simulação é feita para regime permanente e transitório. Para a análise transitória, são aplicadas duas faltas, uma falta DC no ponto médio da linha DC e, para o caso AC, duas faltas (duas situações), uma falta fase-terra e outra trifásica-terra, ambas aplicadas no lado do inversor.

Para a falta DC e AC são analisados o tempo de subida, o tempo de acomodação e sobrepasso, assim como a tensão e corrente DC do retificador e corrente AC do inversor para o caso de faltas DC, e tensão e corrente DC do inversor e corrente AC do inversor para o caso de faltas AC. Comparação de tempo de execução e memória mostra que o PSCAD/EMTDC é mais rápido que o PSCAD-SIMULINK. A interface PSCAD-SIMULINK gastou mais tempo devido ao fato da troca de informações entre os dois aplicativos a cada passo de tempo, mas a memória usada para este caso foi a menor devido à repartição de tarefas (sistema de potência no PSCAD e controle do sistema pelo SIMULINK).

Um esquema HVDC (*two-time step*) é validado, assim como a sua dinâmica L/R em [32]. Tal modelo é comparado com o (*response-type*). O protótipo proposto por Brandt, Annakkage, Dennis e Kshatriya, tem o controle rápido do detalhado HVDC e um tempo total de computação reduzido. Os autores propõem que ao invés de compilar a simulação e ver como serão os resultados, o usuário especifica como será a resposta. O conversor do modelo é modelado através de equações, representando a linha DC, o cabo e sistema DC. A simulação estuda três testes: o primeiro simula a tensão AC na barra retificadora, o segundo simula a corrente DC e o terceiro, a tensão AC na barra retificadora, a velocidade rotórica e a corrente DC.

Nos três testes, o modelo proposto (*two-time step*) é simulado pelo aplicativo PSS/E ("escrito" pelo usuário), o "*response –type*" é simulado pelo PSS/E (*library*) e cada uma dessas simulações são comparadas com a simulação com PSCAD/EMTDC. Em todos os testes, o modelo "*two-time step*" teve resultados mais coerentes, em termos de precisão, que o modelo "*response-type*", quando comparados com os resultados obtidos pelo aplicativo PSCAD/EMTDC.

Um modelo de VSC para HVDC é proposto em [33] em um modo D-Q (transformada de Park). Esse modelo é validado com a comparação pelo *software*

PSCAD/EMTDC. A modelagem HVDC é estudada pelo lado AC com os geradores representados por fontes trifásicas, modelagem do lado DC, acoplamento AC-DC, todos com equações algébricas e a modelagem AC-DC com equações em espaço de estados. Correntes do lado esquerdo e direito são analisadas em coordenadas D-Q, assim como a corrente entre os dois conversores e a tensão DC e comparadas (EMTDC x espaço de estados). Também é usado a técnica "*LgV*" para controlar o conjunto HVDC-VSC e as variáveis a serem controladas são: potência reativa do lado esquerdo e direito do sistema, potência ativa no lado direito do sistema e tensão DC no lado esquerdo. Tal controle é feito para regime permanente e referências são adotadas para o controle.

A análise de potência reativa mostra um pequeno acoplamento, quando a respectiva potência ativa muda, mostrando que o controlador "*LgV*" não consegue um total desacoplamento das saídas. No controle da tensão DC, o controlador mostra um acoplamento com o resto das saídas, sendo o acoplamento transitório. A validação do modelo com o PSCAD/EMTDC mostra que o modelo é suficientemente preciso. O controlador mostrou um bom desempenho, mas precisa ser melhorado no que diz respeito ao acoplamento transitório entre as saídas e a capacidade de rejeição de perturbação.

Novamente em [34] é usado um modelo de transmissão de corrente contínua com o dispositivo VSC, segundo Chao, Xiaoxin e Ruomei. Este modelo usa o chamado VSC-HVDC que tem características como: a carga passiva AC que pode ser suprida, a potência ativa e reativa que podem ser controladas separadamente e simultaneamente e a não necessidade de rápida comunicação entre as estações equipadas com VSC.

O modelo consiste em três partes: o modelo "*quase-steady*", o modelo dinâmico e o modelo de controle. O "*quase-steady*" é assim chamado porque as tensões e correntes são descritas por fasores, indutores e capacitores e são descritas por impedâncias fundamentais. O modelo de controle é baseado na técnica PWM (*Pulse Width Modulation*). Uma simulação faz a potência ativa de referência no primeiro VSC ser diminuída em passos, mostrando a resposta transitória para a potência ativa no primeiro VSC, tensão em duas das barras do modelo e ângulos rotóricos entre geradores, assim como a potência reativa nos dois VSC's.

Outra simulação estuda um controle adicional de amortecimento, através de um diagrama de blocos, mostrando resultados para ângulos rotóricos, tensão em uma barra do modelo, potência ativa em uma linha AC do modelo, potência ativa e reativa do primeiro VSC e ângulo de deslocamento [34]. Os resultados da simulação – UPI (*User*

Program Interface) fornecido pelo PSASP (*Power System Analysis Software Package*) - mostraram uma boa capacidade de controlar o fluxo de potência na linha e também melhora a estabilidade, diminuindo as oscilações transitórias para a potência ativa e reativa, tensões em barra e ângulos rotóricos de geradores no caso de uma falta trifásica no ponto médio de uma das linhas AC do modelo, com o auxílio de um dispositivo de controle amortecedor.

Em 2007, Martinez, Esquivel, Pérez e Acha propõem um modelo com o uso de VSC em que se aplica em um estudo de Fluxo de Potência Ótimo [35]. Tal modelo usa o método de Newton para incorporar um dispositivo VSC-HVDC, também chamado *HVDC-Light*® ou *HVDC-Plus*®, no FPO e um algoritmo é desenvolvido para tal fim. Assim, o VSC-HVDC é modelado através de equações, assim como as equações de fluxo e controle. O FPO é abordado usando a função de Lagrange aumentada, modelando as equações e inequações e suas restrições, respeitando os limites.

O controle de potência ativa de um conversor pode ser ajustado para controlar tanto a potência ativa ou a tensão DC; e o controle de potência reativa, pode ser ajustado para controlar tanto a potência reativa ou a amplitude da tensão AC. Dois sistemas são simulados computacionalmente para demonstrar a validade do algoritmo. A função objetivo é usada para custos. O algoritmo é empregado com sucesso pelos resultados numéricos, e mostra a capacidade do método em controlar a potência ativa e reativa, e amplitude de tensão de maneira mais econômica, mantendo os limites numéricos das variáveis impostos sobre o sistema.

Uma modelagem para HVDC *Back-to-Back* é feita para uma transmissão entre China e Rússia em [36]. O modelo detalhado consiste de PPC (controle do pólo de potência), CFC (controle do disparo do conversor), RPC (controle de potência reativa) e TDC (controle de mudança de tap). O sistema primário e o modelo de controle do sistema HVDC, assim como os quatro controles citados anteriormente são modelados e descritos no trabalho e efetuada uma otimização do VDCOL, que é muito importante no processo de recuperação de faltas na análise de potência DC.

O uso do simulador PSCAD/EMTDC permite a simulação de regime permanente para a relação entre a corrente DC e a tensão DC mostrando uma relação linear entre as duas grandezas. A resposta dinâmica também é feita para a análise de recuperação de falta AC/DC, com a corrente DC, tensão DC e potência DC, onde essas grandezas são alteradas em passos pequenos para fazer a análise. O modelo VDCOL é usado para estudar a recuperação da potência DC para uma falta trifásica-terra.

Em [37] um modelo de "*Quasi-Steady-State*" é usado para simulação de faltas para análise de estabilidade transitória com bons resultados em relação à recuperação do sistema no caso de faltas. Assim um VSC-HVDC "*Quasi-Steady-State*" é modelado para representar sua dinâmica para a interação AC/DC. O modelo inclui ponte conversora trifásica controlada, o reator do conversor, capacitor DC, e os filtros AC. A corrente DC e a amplitude da potência ativa pode ser controlada por meio do ângulo de disparo e a potência reativa do VSC pode ser controlada por meio da amplitude da tensão AC na saída do conversor.

O trabalho discorre sobre o SPWM (Modulação por Largura de Pulso Senoidal), onde a amplitude da potência ativa e reativa e a direção de transmissão podem ser controladas por meio da fase e amplitude da razão de modulação do SPWM e também aborda a técnica PWM (Modulação por Largura de Pulsos).

Uma vez que a tensão DC do VSC influi diretamente a tensão de saída no lado AC, a dinâmica do sistema DC é elaborada, assim como o modelo de controle do VSC-HVDC. Um sistema de sete barras é simulado com dois casos. No primeiro, a potência ativa varia de um valor para outro e no segundo caso, a tensão DC varia. Essas variações são comparadas, com o simulador PSCAD/EMTDC, apresentando boa concordância, além disso, a potência ativa nos terminais do receptor, a tensão DC e tensão AC na barra 2 são analisadas para uma falta AC na barra 7 do sistema.

Os resultados mostraram que a potência ativa do segundo VSC aumenta e o capacitor descarrega e sua tensão cai, e a potência ativa nos terminais do receptor também aumenta para manter a tensão AC. Um regulador tipo PI traz de volta o sistema para o regime permanente e adicionando o VSC-HVDC o sistema se recupera mais rapidamente da falta.

O efeito de uma falha na estabilidade de sistemas HVDC é abordado em [38]. São estudados dois casos, onde a falta é localizada no lado DC do conversor para os dois casos. No primeiro caso, um sistema HVDC bipolar transmite energia para uma área chamada Pookland. No segundo caso, transmite energia para a mesma área, porém com um circuito híbrido paralelo HVAC-HVDC. As equações básicas do sistema HVDC são fornecidas neste trabalho. Os resultados simulam o comportamento do ângulo rotórico e tensão terminal de geradores para as faltas.

O capítulo a seguir mostra os principais equipamentos encontrados em sistemas de transmissão em corrente contínua, assim como uma descrição do dispositivo SVC, usado nas simulações.

CAPÍTULO 3

Componentes de um Sistema HVDC

Neste capítulo são abordados os principais componentes de um sistema de transmissão em corrente contínua, assim como as diferenças encontradas entre a configuração monopolar e bipolar.

3.1 – Sistema HVDC monopolar e o HVDC bipolar

Duas configurações são mais usuais para o circuito HVDC. A figura 3.1 representa a primeira possibilidade, o circuito monopolar. O circuito monopolar consiste de uma fase com retorno pelo solo. Este esquema possui a desvantagem da circulação de altas correntes através do solo, o que pode ocasionar uma corrosão de pé de torre, tubulações e outros equipamentos situados ao longo da transmissão, e também outros efeitos adversos. [39].

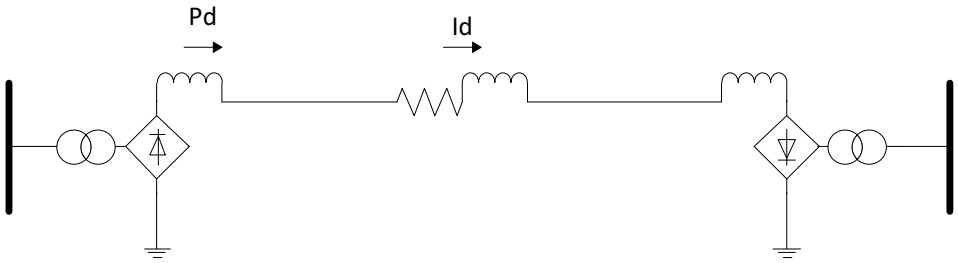

Figura 3.1 – Sistema HVDC monopolar. [3]

A figura 3.2 representa a configuração bipolar do circuito HVDC. A transmissão é feita por dois condutores e, sob condições ideais e de regime permanente, não há circulação de corrente pelo solo. [40]

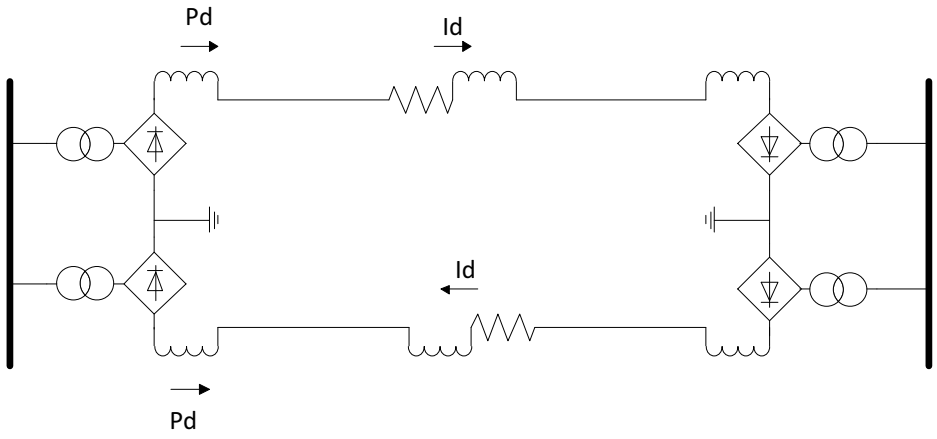

Figura 3.2 – Sistema HVDC bipolar.

O circuito HVDC bipolar é simétrico, sendo assim, ele pode ser representado por um circuito equivalente composto de dois circuitos monopolares, como é representado na figura 3.3. Com exceção da corrente, que permanece a mesma, todas as grandezas elétricas são multiplicadas por dois.

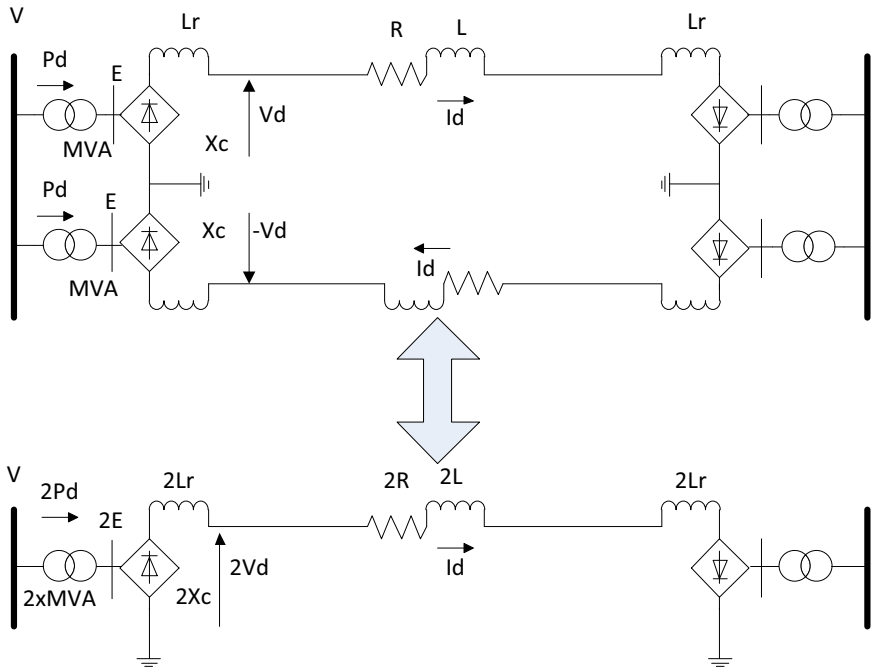

Figura 3.3 – Monopolo equivalente do HVDC.

3.2 – Capacidade de transmissão

Quando se faz a comparação entre uma linha HVDC e uma linha HVAC [40], pode-se admitir que a corrente por condutor é igual, de modo que sejam usados condutores de mesma bitola nos dois tipos de linha. Assim:

$$I_{cc} = I_{ca} \tag{3.1}$$

Como o número de isoladores é definido de acordo com a classe de tensão, para que a cadeia de isoladores tenha o mesmo número de discos, pode-se escolher a tensão em corrente contínua como a tensão máxima especificada para corrente alternada, desse modo:

$$V_{cc} = \sqrt{2}V_{ca} \tag{3.2}$$

A potência ativa por fase, no caso de corrente alternada, a potência por pólo em corrente contínua, e a relação entre elas são dadas por:

$$P_{ca} = V_{ca}.I_{ca}.\cos\phi \tag{3.3}$$

$$P_{cc} = V_{cc}.I_{cc} \tag{3.4}$$

$$\frac{P_{cc}}{P_{ca}} = \frac{V_{cc}.I_{cc}}{V_{ca}.I_{ca}.\cos\phi} = \frac{\sqrt{2}V_{ca}.I_{ca}}{V_{ca}.I_{ca}.\cos\phi} = \frac{\sqrt{2}}{\cos\phi} \tag{3.5}$$

A comparação é feita supondo o sistema HVDC bipolar e o sistema HVAC trifásico. Substituindo a equação 3.5 em 3.6 e admitindo um valor de 0,94 para o fator de potência, que é um valor típico para linhas de transmissão, chega-se à seguinte conclusão:

$$\frac{P_{cc}'}{P_{ca}'} = \frac{2P_{cc}}{3P_{ca}} = \frac{2(1.5P_{ca})}{3P_{ca}} = 1 \tag{3.6}$$

A equação 3.6 mostra que a capacidade de energia transmitida em corrente contínua e corrente alternada são iguais. Portanto, para transmitir a mesma quantidade de potência, o sistema HVDC utiliza 2/3 do número de isoladores do sistema HVAC. O mesmo ocorre para o comprimento total de cabos, são necessário 2/3 do total gasto pelo sistema HVAC.

3.3 – Estações Conversoras

As barras AC conectadas aos conversores são conhecidas como barras de interface. Os filtros "shunts" nos conversores servem para evitar que os harmônicos surgidos nos conversores, através do chaveamento, possam se propagar para o sistema AC. Esses filtros também podem suprir parte da potência reativa para a operação dos conversores. Os transformadores conversores têm a função de ajustar a tensão AC/AC para o correto funcionamento da ponte AC/DC. A tensão DC pode ser controlada pelo ajuste de tap junto com o ângulo de disparo das válvulas conversoras. [39]

A válvula conversora é uma Ponte de Graetz, uma ponte trifásica de onda completa de 6 pulsos. A associação série de duas dessas pontes (12 pulsos) minimiza a injeção de harmônicos no sistema AC. Os transformadores são projetados com ligações Y-Δ e Y-Y, para que haja uma defasagem de 30 graus da tensão AC de uma ponte de 6 pulsos em relação à outra ponte. Reatores de alisamento são colocados em série com a linha a fim de diminuir as ondulações de corrente DC.

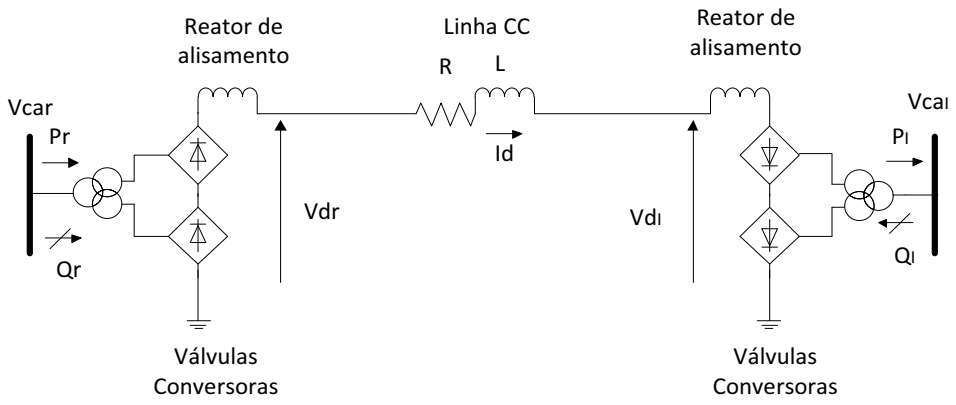

Figura 3.4 – Sistema HVDC mostrando os reatores de alisamento, impedância da linha e válvulas conversoras.

3.4 – Tap HVDC

Como mencionado no capítulo 1, não é tão direto, como no caso AC, injetar ou drenar potência em um ponto intermediário de um elo DC com o transformador de potência. Para ser possível tal processo, usa-se um dispositivo chamado Tap HVDC, que consiste em um conversor DC/AC. A figura 3.5 representa um Tap HVDC conectado em um sistema HVDC bipolar. No caso bipolar, há um aterramento na parte central das válvulas conversoras, fazendo com que haja simetria entre a tensão V_{DR1} em um polo com a tensão V_{DR2} no outro polo.

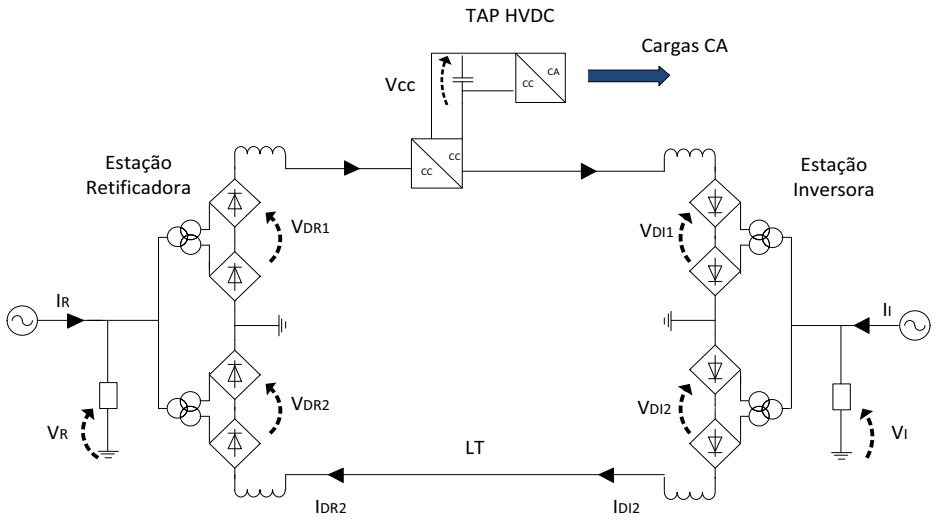

Figura 3.5 – Tap HVDC em um sistema HVDC bipolar, mostrando as estações retificadoras e inversoras. O tap HVDC possui um inversor para atender as cargas.

O Tap HVDC é composto por um conversor DC/DC e um capacitor sendo carregado por este conversor. O capacitor tem a função de manter a tensão na entrada DC do inversor que suprirá as cargas conectadas ao elo DC.

O transformador com núcleo de ar é usado em situações que se deseja diminuir as perdas por histerese. O uso desse transformador é proposital, pois o conversor do Tap HVDC opera com altas frequências e um transformador de núcleo de ferro convencional apresentaria altas perdas por histerese e correntes parasitas. O transformador com núcleo de ar deve isolar eletricamente os equipamentos ligados no seu enrolamento secundário do nível de tensão do sistema em HVDC, e ajustar o valor de tensão e corrente no secundário [3].

A figura 3.6 apresenta o esquema do conversor DC/DC do Tap HVDC. A corrente de nível DC carrega o capacitor principal quando a chave está aberta. Ao fechar a chave, a tensão do capacitor passa para o terminal de alta tensão do

transformador (primário). Com esse chaveamento surge uma tensão alternada nos terminais do transformador e sendo assim é possível drenar potência no elo DC.

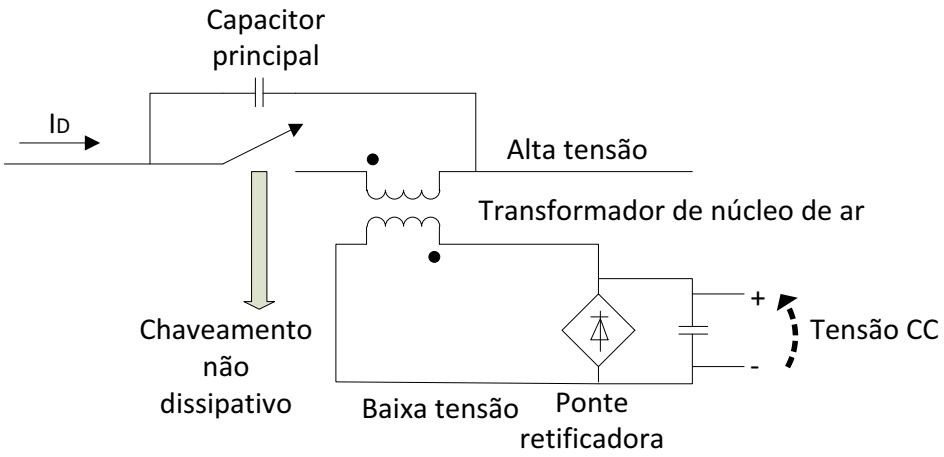

Figura 3.6 – Conversor DC do Tap HVDC, sendo possível drenar potência do HVDC. Nesse conversor foi usado um transformador com núcleo de ar.

A tensão DC nos terminais da ponte retificadora, na figura 3.6, alimentará o capacitor, que por sua vez transmitirá uma tensão adequada para o lado DC do inversor conectado às cargas.

3.5 – Dispositivos FACTS

Os dispositivos FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*) são projetados para melhorar a qualidade de energia transmitida. Estes tornam o sistema mais flexível possibilitando a mudança rápida de grandezas elétricas como tensão, corrente, potências reativa e ativa, ângulos e impedâncias. Assim essas grandezas podem ser alteradas para valores favoráveis com uma maior velocidade. Esses equipamentos podem ser conectados em derivação, série ou os dois.

A utilização dos FACTS tem muitas aplicações como exemplificado em [41]. Para o sistema de energia são elas:

- Ajuste de tensão em sistemas elétricos com altas variações de tensão;
- Diminuição das perdas na transmissão de energia;
- Aumento da capacidade de energia transmitida na linha;
- Aumento do limite da estabilidade em transitório;
- Amortecimento e atenuação de oscilações do sistema; e

- Melhoria do suprimento de tensão.

Para as cargas tem-se:

- Uma maior estabilização de tensão nos terminais de linhas longas;
- Menor consumo de potência reativa;
- Correção de assimetrias de corrente;
- Diminuição de perdas no sistema como um todo; e
- Diminuição das oscilações de tensão, *flicker*, harmônicos e outras distorções.

3.5.1 – SVC (*Static Var Compensator*)

A compensação de reativos é feita através de capacitores e indutores. Os tiristores têm a função de controlar a potência reativa no sistema uma vez que controla a corrente que flui pelos reatores. A função básica do SVC é o controle de tensão, então ele fornece ou absorve reativo e assim, a tensão da barra se mantém próxima da tensão de referência.

A tensão da barra onde o SVC está conectado é comparada com uma tensão de referência. Um regulador do tipo PI (proporcional – integral) produz em sua saída uma corrente que é referência para um gerador de reativos e, dependendo dessa corrente de referência, o gerador de reativos injeta ou absorve potência reativa na barra, logo a tensão na barra fica bem próxima da tensão de referência. Quando a tensão na barra cai, o gerador de reativos fornece reativo (capacitivo) aumentando a tensão da barra. Caso contrário, se a tensão na barra aumenta, o gerador de reativos absorve reativo (indutivo) e a tensão na barra diminui.

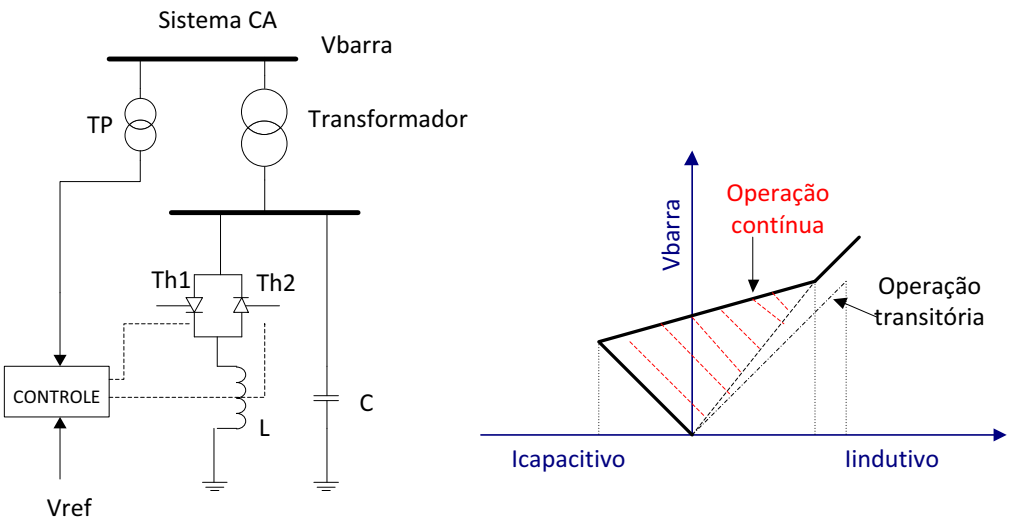

Figura 3.7 – (a) Esquema unifilar do SVC. (b) Curva tensão – corrente para o ponto de conexão do SVC.

A figura 3.7 representa o esquema do SVC, assim como o gráfico de tensão, que mostra a região de operação (capacitiva ou indutiva).

CAPÍTULO 4

Fluxo de Potência em Transmissão HVDC

Este capítulo apresenta o conjunto de equações que regem o fluxo de carga em corrente contínua. O estudo é feito a partir de diagrama de barras, mostrando o fluxo de potência. Maiores detalhes podem ser encontrados em [42].

4.1 – Fluxo de potência

A seguir são mostradas as equações do modelo *VSC-HVDC* (que é um sistema de transmissão de potência desenvolvido por várias décadas) e depois na seção seguinte o modelo *benchmark* (IEEE). São equações que definem fluxo de potência ativa e reativa nos conversores, e tensões e ângulos nas barras do sistema em transmissão em corrente contínua.

4.1.1 – Equações do elo DC para o modelo *VSC-HVDC*

O circuito equivalente é baseado nos conversores *shunt*, equivalendo a dois STATCOM conectados nos terminais *k* e *m*.

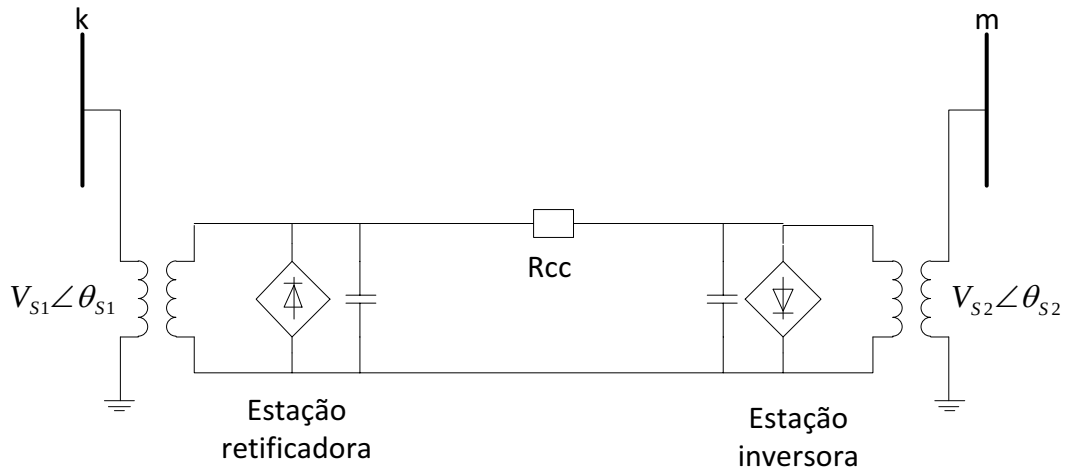

Figura 4.1 - Esquema do elo DC para o modelo SVC-HVDC.

O balanço de potência ativa entre o retificador e o inversor deverá ser zero, entretanto, o sistema pode operar com o inversor fornecendo a potência necessária para

o funcionamento do retificador, e vice-versa. Um circuito equivalente ao da figura 4.1 é dado na figura 4.2, onde as equações 4.1 e 4.2 representam as tensões no conversor ligado às barras *k* e *m*, respectivamente. As equações 4.3 e 4.4 são as admitâncias em série.

$$V_{S1} = |V_{S1}|(\cos\theta_{S1} + jsen\theta_{S1}) \tag{4.1}$$

$$V_{S2} = |V_{S2}|(\cos\theta_{S2} + jsen\theta_{S2}) \tag{4.2}$$

$$Y_{S1} = \frac{1}{Z_{S1}} = g_{S1} + jb_{S1} \tag{4.3}$$

$$Y_{S2} = \frac{1}{Z_{S2}} = g_{S2} + jb_{S2} \tag{4.4}$$

P_{CC} representa a potência no elo DC e R_{CC} a resistência. As equações 4.7 a 4.10 são limites de tensão e ângulo, impostos pelo modelo. A potência DC também é função do quadrado da diferença entre a tensão DC no lado do retificador e a tensão DC no lado do inversor, dividida pela resistência da linha DC.

$$P_{cc} = (V_{S1} - V_{S2})^2 g_{cc} \tag{4.5}$$

$$g_{cc} = \frac{1}{R_{cc}} \tag{4.6}$$

$$V_{S1\min} \le V_{S1} \le V_{S1\max} \tag{4.7}$$

$$0 \le \theta_{S1} \le 2\pi \tag{4.8}$$

$$V_{S2\min} \le V_{S2} \le V_{S2\max} \tag{4.9}$$

$$0 \le \theta_{S2} \le 2\pi \tag{4.10}$$

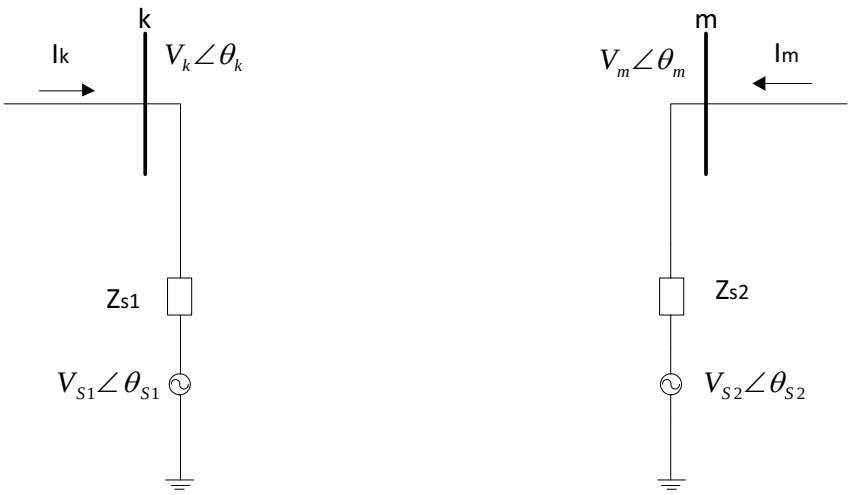

Figura 4.2 – Modelo equivalente para o elo DC do VSC-HVDC

As potências geradas pelos conversores *shunts* são dadas pelas equações 4.11 e 4.12 (retificador), e equações 4.13 e 4.14 (inversor).

$$P_{S1} = V_{S1}^2 g_{S1} - V_{S1}V_k\left(g_{S1}\cos(\theta_{S1}-\theta_k) + b_{S1}sen(\theta_{S1}-\theta_k)\right) \tag{4.11}$$

$$Q_{S1} = -V_{S1}^2 b_{S1} - V_{S1}V_k\left(g_{S1}sen(\theta_{S1}-\theta_k) - b_{S1}\cos(\theta_{S1}-\theta_k)\right) \tag{4.12}$$

$$P_{S2} = V_{S2}^2 g_{S2} - V_{S2}V_m\left(g_{S2}\cos(\theta_{S2}-\theta_m) + b_{S2}sen(\theta_{S2}-\theta_m)\right) \tag{4.13}$$

$$Q_{S2} = -V_{S2}^2 b_{S2} - V_{S2}V_m\left(g_{S2}sen(\theta_{S2}-\theta_m) - b_{S2}\cos(\theta_{S2}-\theta_m)\right) \tag{4.14}$$

As potências nas barras onde é conectado o *Back to Back* são dadas pelas equações 4.15 e 4.17 (barra *k*) e equações 4.16 e 4.18 (barra *m*).

$$P_k = V_k^2 g_{S1} - V_k V_{S1}\left(g_{S1}\cos(\theta_k-\theta_{S1}) + b_{S1}sen(\theta_k-\theta_{S1})\right) \tag{4.15}$$

$$P_m = V_m^2 g_{S2} - V_m V_{S2}\left(g_{S2}\cos(\theta_m-\theta_{S2}) + b_{S2}sen(\theta_m-\theta_{S2})\right) \tag{4.16}$$

$$Q_k = -V_k^2 b_{S1} - V_k V_{S1}\left(g_{S1}sen(\theta_k-\theta_{S1}) - b_{S1}\cos(\theta_k-\theta_{S1})\right) \tag{4.17}$$

$$Q_m = -V_m^2 b_{S2} - V_m V_{S2}\left(g_{S2}sen(\theta_m-\theta_{S2}) - b_{S2}\cos(\theta_m-\theta_{S2})\right) \tag{4.18}$$

Formação da Jacobiana do sistema de equações não-lineares do método de Newton:

$$\Delta P_{S1S2} = P_{S1S2}^{esp} - P_{S1S2}^{calc} \tag{4.19}$$

Onde:

P_{S1}^{esp} é a potência especificada no retificador e P_{S2}^{esp} é a potência especificada no inversor. P_{S1S2}^{esp} na equação 4.19 vale zero e deve-se ao fato de a potência necessária para a operação do retificador ser suprida pelo inversor, e para a operação do inversor ser suprida pelo retificador.

$$P_{S1S2} = P_{S1} + P_{S2} + P_{cc} \tag{4.20}$$

O sistema de equações não-lineares do método de Newton Raphson, segundo o modelo *VSC-HVDC*, é dada pela equação 4.21.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_{S1} \\ \Delta Q_{S1} \\ \Delta P_{S1S2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_{S1}} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{S1}} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_{S2}} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial V_k} & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_{S1}} & \frac{\partial P_m}{\partial V_{S1}} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_{S2}} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_{S1}} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_{S1}} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_{S2}} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_{S1}} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_{S1}} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_{S2}} \\ \frac{\partial P_{S1}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{S1}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{S1}}{\partial V_k} & \frac{\partial P_{S1}}{\partial V_m} & \frac{\partial P_{S1}}{\partial \theta_{S1}} & \frac{\partial P_{S1}}{\partial V_{S1}} & \frac{\partial P_{S1}}{\partial \theta_{S2}} \\ \frac{\partial Q_{S1}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_{S1}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_{S1}}{\partial V_k} & \frac{\partial Q_{S1}}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_{S1}}{\partial \theta_{S1}} & \frac{\partial Q_{S1}}{\partial V_{S1}} & \frac{\partial Q_{S1}}{\partial \theta_{S2}} \\ \frac{\partial P_{S1S2}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{S1S2}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{S1S2}}{\partial V_k} & \frac{\partial P_{S1S2}}{\partial V_m} & \frac{\partial P_{S1S2}}{\partial \theta_{S1}} & \frac{\partial P_{S1S2}}{\partial V_{S1}} & \frac{\partial P_{S1S2}}{\partial \theta_{S2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \Delta V_k \\ \Delta V_m \\ \Delta \theta_{S1} \\ \Delta V_{S1} \\ \Delta \theta_{S2} \end{bmatrix} \tag{4.21}$$

4.1.2 – Modelo de equações para o elo HVDC clássico

No modelo exposto não há filtros no retificador nem no inversor. Para ângulos de disparo compreendidos entre 0º e 90º, o conversor opera na configuração retificadora e entre 90º e 180º, na configuração inversora. Para o retificador, α e δ são ângulos de disparo e de extinção, respectivamente. Para o inversor, β e γ são ângulos de disparo e extinção, e u é o ângulo de comutação devido à característica indutiva não ideal da fonte alternada.

$$\beta = \pi - \alpha \tag{4.22}$$

$$\gamma = \pi - \delta \tag{4.23}$$

$$u = \delta - \alpha = \beta - \gamma \tag{4.24}$$

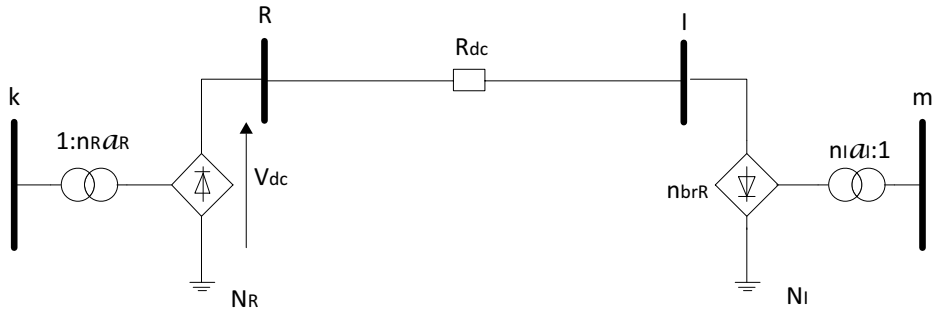

Figura 4.3 – Modelo de elo DC para o HVDC clássico.

Na figura 4.3, n_R, a_R, n_I e a_I são a relação de transformação do conversor e o tap devido à indutância do conversor para o retificador e inversor, nesta ordem. Na figura 4.4, n_{pR} e n_{pI} são o número de pontes do retificador e inversor, nesta ordem. N_R e N_I são os pontos de conexão à terra do retificador e inversor, respectivamente.

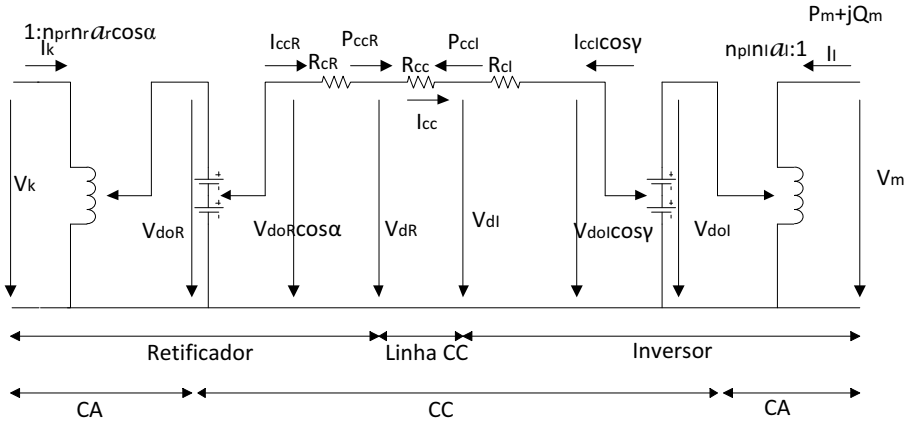

Figura 4.4 – Diagrama unifilar para o HVDC clássico

O subíndice '*R*' refere-se ao retificador, cujas equações são análogas para o inversor. As equações 4.25 e 4.26 representam a corrente e potência no elo DC.

$$I_{ccR} = (V_{dR} - V_{dI})g_{cc} \tag{4.25}$$

$$P_{ccR} = V_{dR}(V_{dR} - V_{dI})g_{cc} \tag{4.26}$$

$$Q_{ccR} = P_{ccR}.\tan\phi_R \tag{4.27}$$

A equação 4.27 fornece a potência reativa no retificador. A equação 4.28 representa o ângulo do fator de potência e a equação 4.29, o ângulo de sobreposição. As equações 4.30 e 4.31 representam a tensão DC e a resistência do conversor.

$$\phi_R = \arctan g\left[\frac{2u_R + sen2\alpha_R - sen2(\alpha_R + u_R)}{\cos 2\alpha_R - \cos 2(\alpha_R + u_R)}\right] \tag{4.28}$$

$$u_R = \arccos\left[\cos\alpha_R - \frac{\sqrt{2}X_{cR}I_{cc}}{a_R V_k}\right] \tag{4.29}$$

$$V_{dR} = k_R.a_R.V_k.\cos\alpha_R - R_{cR}.I_{cc} \tag{4.30}$$

$$R_{cR} = \frac{3}{\pi}X_{cR}\frac{n_{pR}}{Z_{bcc}} \tag{4.31}$$

$$k_R = n_R n_{pR}\frac{V_{bcak}}{V_{bcc}} \tag{4.32}$$

A equação 4.32 é um parâmetro para calcular a tensão de nível DC, V_{bcak} e V_{bcc} representam a tensão de base alternada e contínua, respectivamente. Na equação 4.29, X_{cR} é a reatância da fonte na entrada do conversor retificador.

$$I_{cc} = \frac{k_R.a_R.V_k.\cos\alpha_R - k_I.a_I.V_m.\cos\gamma}{R_{cR} + R_{cc} - R_{cI}} \tag{4.33}$$

As potências na barra *k* e *m* terão a contribuição das parcelas em DC, como nas equações 4.34 a 4.37.

$$P_k = P_k^{ca} + P_k^{cc} \tag{4.34}$$

$$P_k^{cc} = P_{ccR} \tag{4.35}$$

$$Q_k = Q_k^{ca} + Q_k^{cc} \tag{4.36}$$

$$Q_k^{cc} = Q_{ccR} \tag{4.37}$$

R_1, R_2 são o controle de tensão DC no retificador e inversor, respectivamente, e deverão ter valores nulos e R_3 é o regulador de potência em corrente contínua. R_1, R_2 e R_3 são variáveis usadas na matriz jacobiana para o processo iterativo.

$$R_1 = V_{dR} - \frac{(R_{cc} - R_{cI})k_R a_R V_k \cos\alpha_R + R_{cR}k_I a_I V_m \cos\gamma_I}{R_{cR} + R_{cc} - R_{cI}} \tag{4.38}$$

$$R_2 = V_{dI} - \frac{(R_{cc} - R_{cR})k_I a_I V_m \cos\gamma_I - R_{cI} k_R a_R V_k \cos\alpha_R}{R_{cR} + R_{cc} - R_{cI}} \tag{4.39}$$

$$R_3 = V_{dR}(V_{dR} - V_{dI})g_{cc} \tag{4.40}$$

Limites de tap´s e ângulos:

$$a_{R\min} \le a_R \le a_{R\max} \tag{4.41}$$

$$\alpha_{R\min} \le \alpha_R \le \alpha_{R\max} \tag{4.42}$$

$$a_{\mathrm{Im}in} \le a_I \le a_{\mathrm{Im}ax} \tag{4.43}$$

$$\gamma_{\mathrm{Im}in} \le \gamma_I \le \gamma_{\mathrm{Im}ax} \tag{4.44}$$

CAPÍTULO 5

Resultados

Este capítulo apresenta os resultados das simulações de um circuito HVDC monopolar. O sistema é simulado por 10s sob diversas condições de operação; tensão DC nominal, tensões DC reduzidas (90% e 80%), corrente DC nominal, correntes DC reduzidas (75% e 50%) e um curto circuito trifásico no lado AC, com resistência de falta de 2Ω. São analisados os valores do modelo do MATLAB e do modelo clássico (modelo clássico) da tensão, corrente, potência ativa e reativa na entrada e saída dos conversores. O aplicativo utilizado nas simulações é o SIMULINK® do MATLAB®, reconhecidamente confiável para simulação de sistemas HVDC em SEP [43].

O conversor retificador opera no modo de controle de corrente, uma vez que é responsável por controlar a corrente DC. O conversor inversor opera no modo de controle de tensão, já que é responsável por controlar a tensão DC.

5.1 Descrição do sistema HVDC monopolar simulado

Trata-se de um sistema de transmissão HVDC de 12 pulsos, 1000MW (500kV, 2kA), usado para transmitir potência de uma rede de 500kV, 5000MVA, 60Hz para outra rede de 345kV, 10.000MVA, 50Hz, figura 5.1.

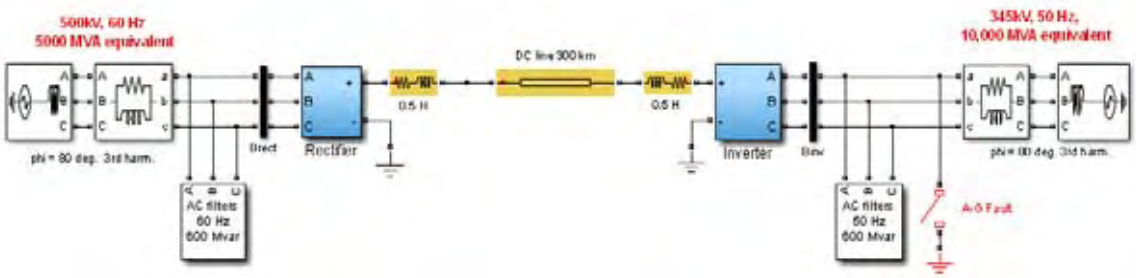

Figura 5.1: Sistema HVDC monopolar utilizado nas simulações.

O retificador e o inversor são conversores de 12 pulsos que usam tiristores em ponte de 6 pulsos conectados em série. O retificador e o inversor são interconectados

através de uma transmissão DC e dois reatores de alisamento de 0.5H. A mudança de taps do transformador não são simuladas e taps fixos são assumidos: 0.9 no lado do retificador e 0.96 no lado do inversor. A potência reativa consumida pelos conversores, distribuídas igualmente num total de 600MVAr em cada lado, é fornecida por: um banco de capacitores, filtros para os harmônicos de ordem 11 e 13 e um filtro passa alta. O transformador retificador tem um tap de 0.4444 e uma reatância indutiva de 6.321Ω, o transformador inversor tem um tap de 0.6039 e uma reatância indutiva de 11.67Ω. Valores fornecidos pelo próprio circuito do MATLAB.

5.2 Simulação com valores distintos de tensão DC

Inicialmente o circuito foi simulado com condições nominais de tensão DC, as figuras 5.2 a 5.11 mostram o conteúdo harmônico e as formas de onda de tensão de fase e corrente de fase. As tensões e correntes foram medidas dos dois lados do filtro AC, nota-se, comparando as figuras 5.4 com 5.6 e 5.9 com 5.11, que o filtro praticamente elimina os harmônicos e corrige o fator de potência dos conversores.

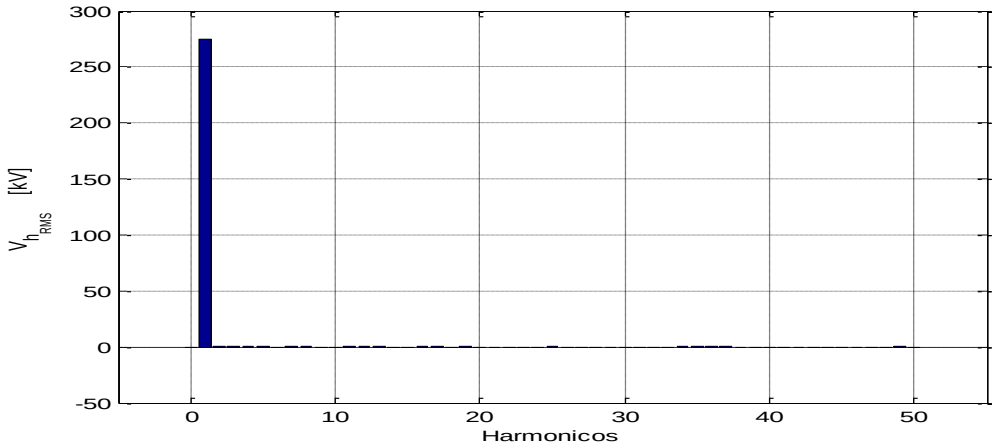

Figura 5.2: Harmônicos de tensão no terminal retificador (filtrado).

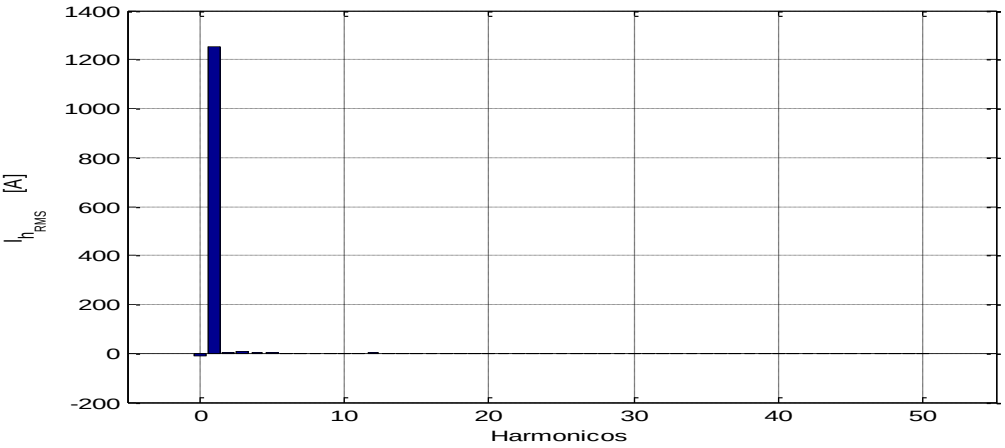

Figura 5.3: Harmônicos de corrente no terminal retificador (filtrado).

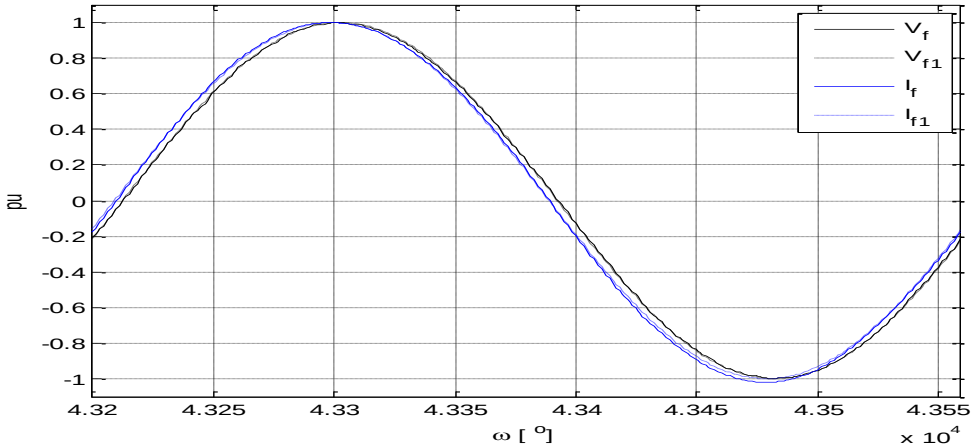

Figura 5.4: Formas de onda no terminal retificador (filtrado).

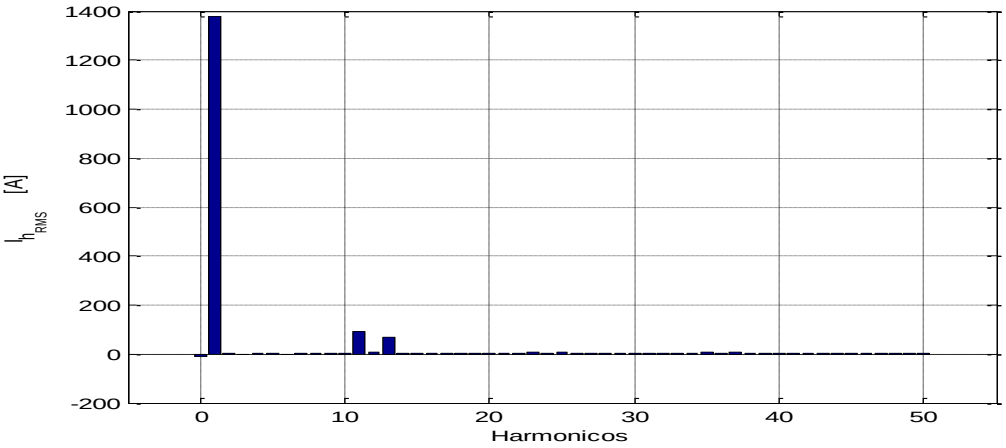

Figura 5.5: Harmônicos de corrente no terminal retificador (não filtrado).

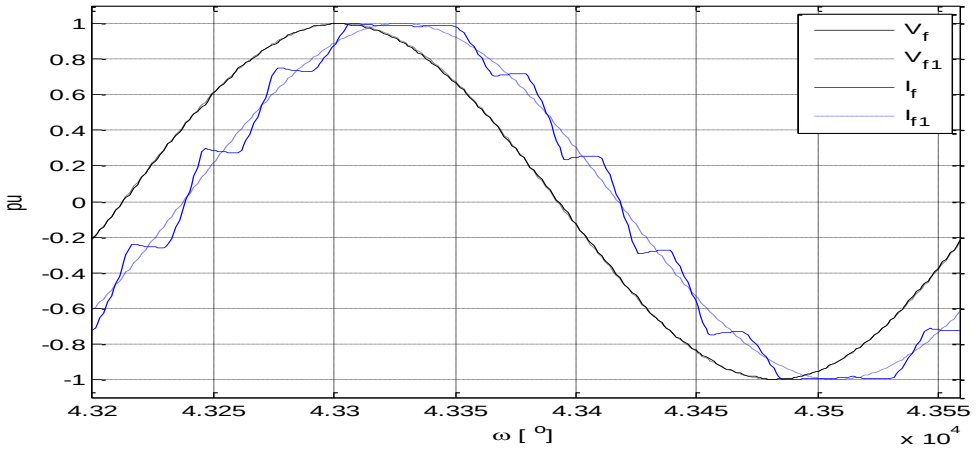

Figura 5.6: Formas de onda no terminal retificador (não filtrado).

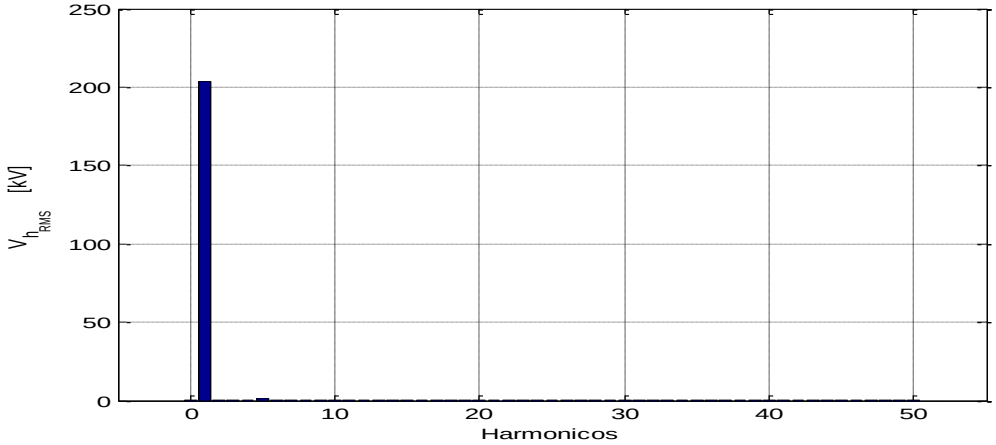

Figura 5.7: Harmônicos de tensão no terminal inversor (filtrado).

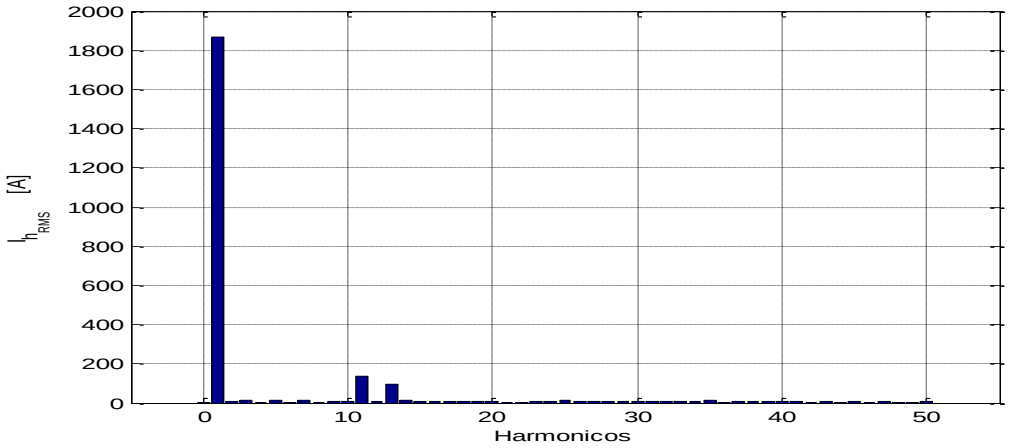

Figura 5.8: Harmônicos de corrente no terminal inversor (não filtrado).

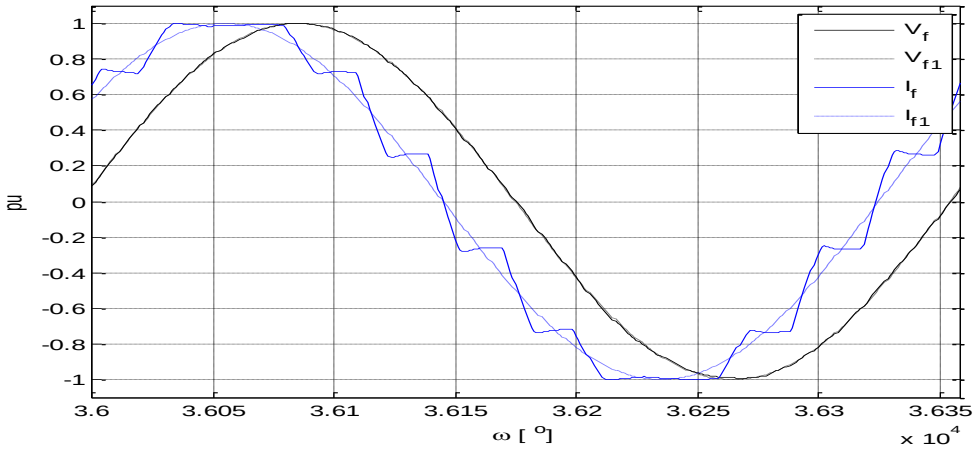

Figura 5.9: formas de onda no terminal inversor (não filtrado).

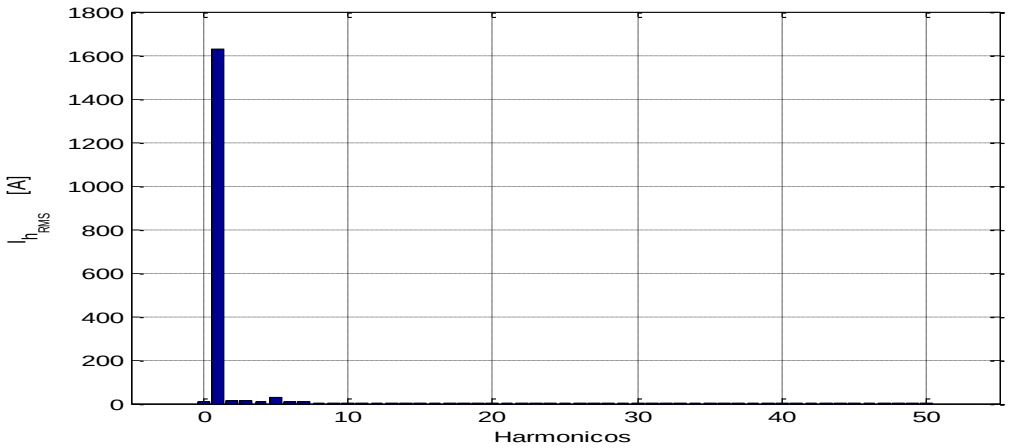

Figura 5.10: Harmônicos de corrente no terminal inversor (filtrado).

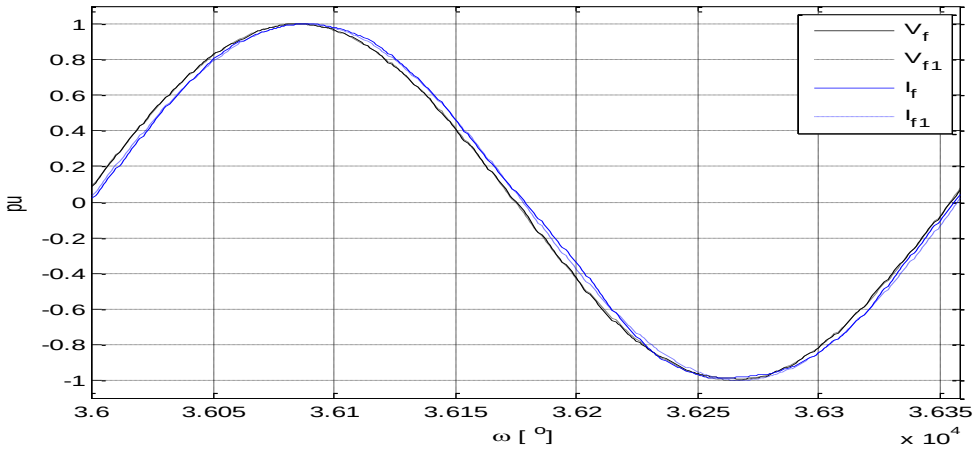

Figura 5.11: Formas de onda no terminal inversor (filtrado).

As figuras 5.12 a 5.18 mostram a tensão e corrente na entrada do link DC junto ao terminal retificador, o ângulo de disparo do retificador, α_R, a potência ativa e reativa

(nos dois lados do filtro) no terminal retificador. As figuras 5.19 a 5.25 mostram a tensão e corrente na saída do link DC junto ao terminal inversor, o ângulo de disparo do inversor, α_I, a potência ativa e reativa (nos dois lados do filtro) no terminal inversor. Três condições de operação foram simuladas, cada uma com um nível distinto de tensão DC. Nota-se o *ripple* elevado na potência ativa e reativa antes da filtragem, que o conversor é ligeiramente capacitivo para tensão nominal e se torna indutivo conforme a tensão DC vai sendo reduzida.

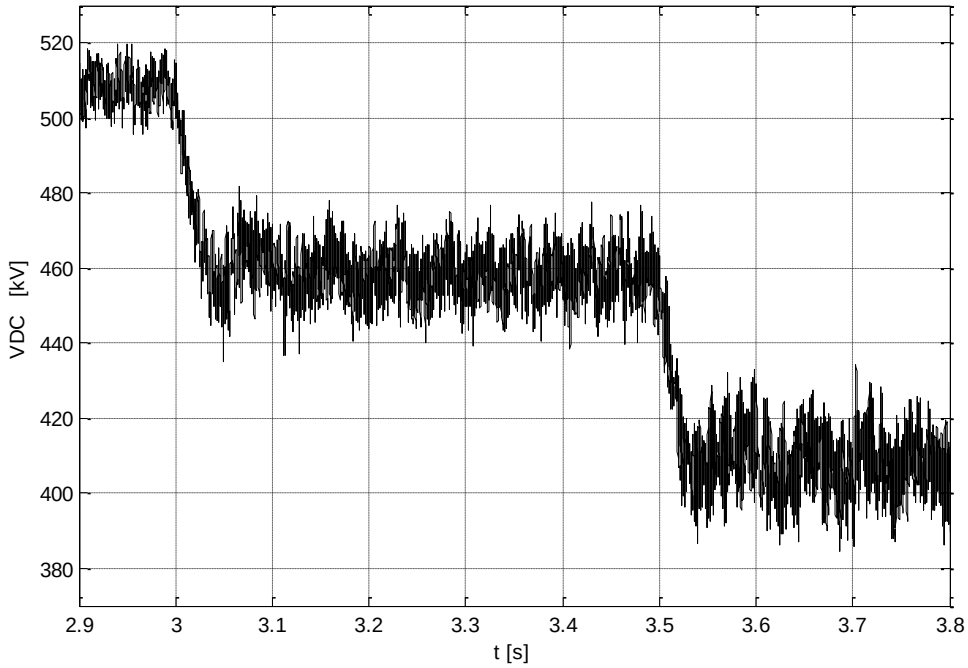

Figura 5.12: Tensão DC no terminal retificador.

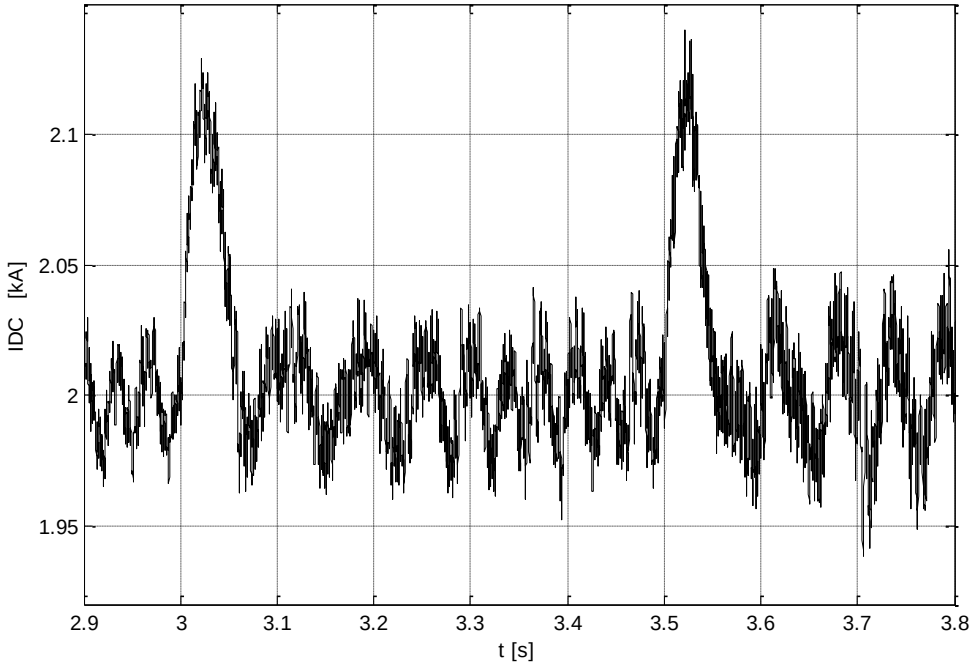

Figura 5.13: Corrente DC no terminal retificador

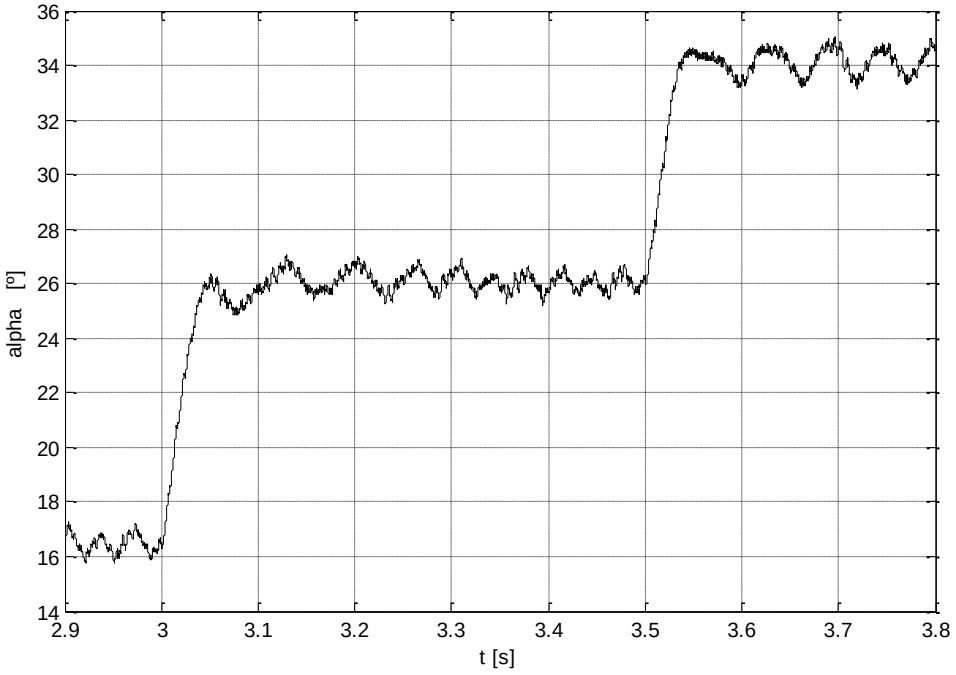

Figura 5.14: Ângulo de disparo do retificador

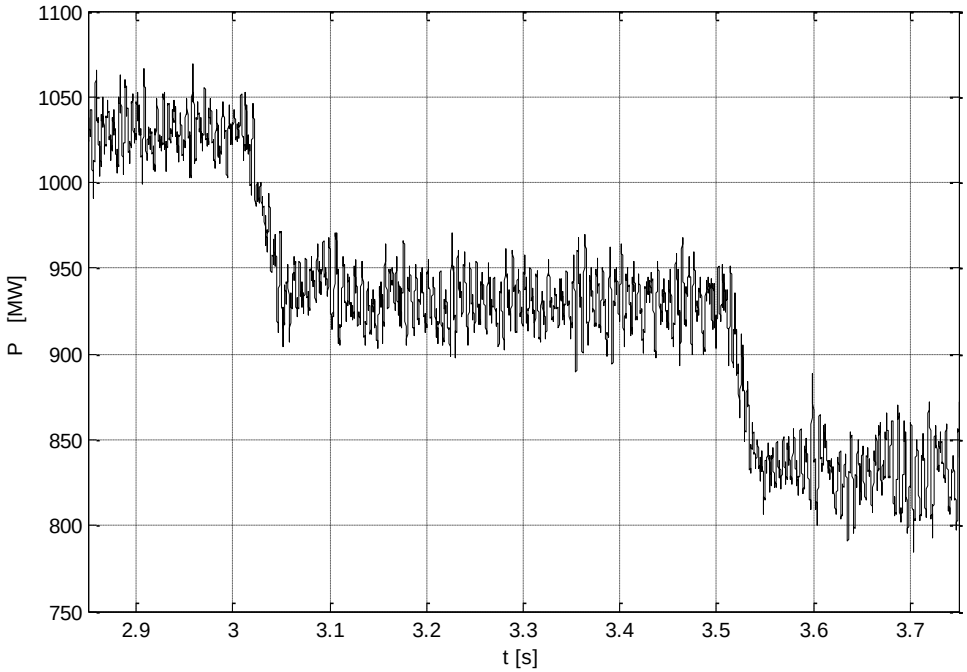

Figura 5.15: Potência ativa filtrada no terminal retificador.

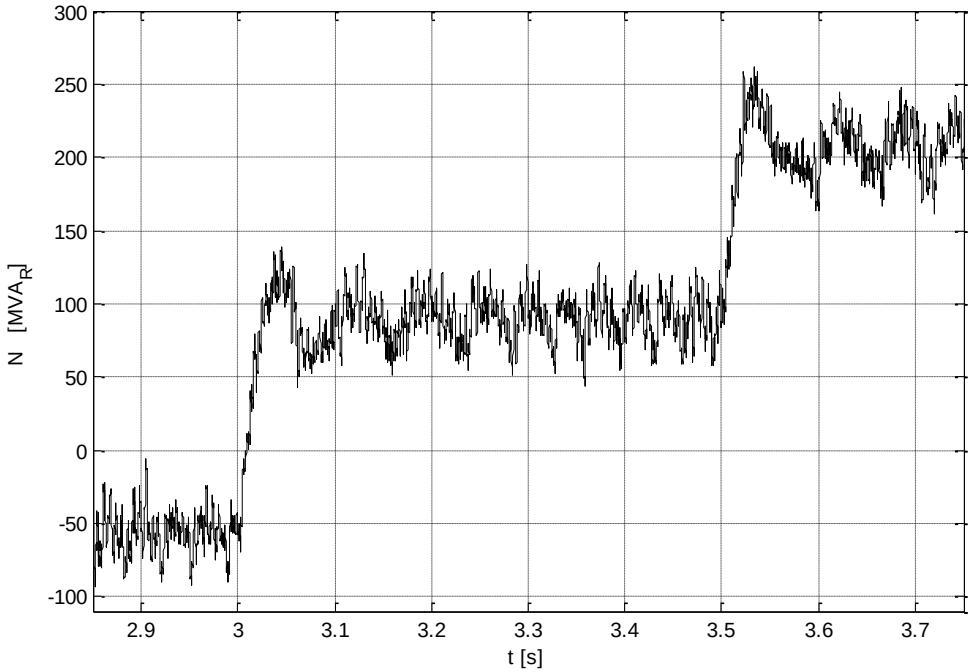

Figura 5.16: Potência reativa filtrada no terminal retificador.

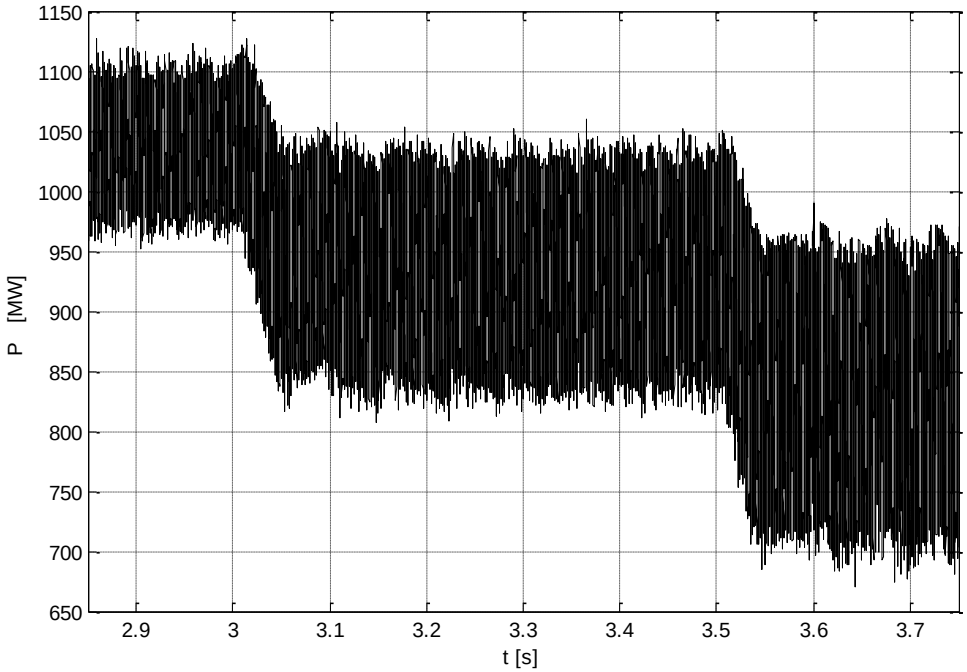

Figura 5.17: Potência ativa não filtrada no terminal retificador.

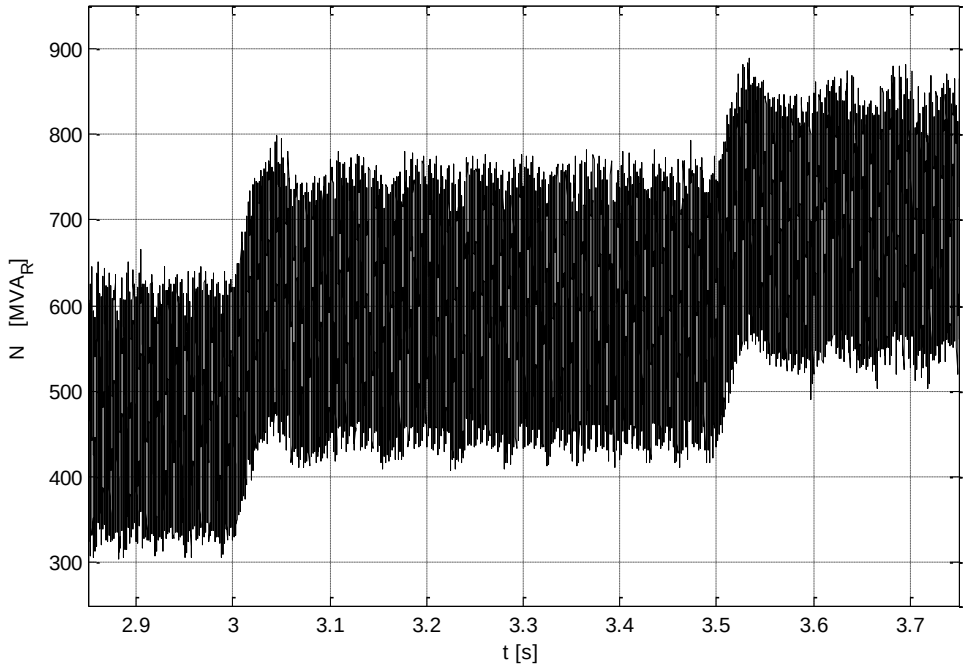

Figura 5.18: Potência reativa não filtrada no terminal retificador

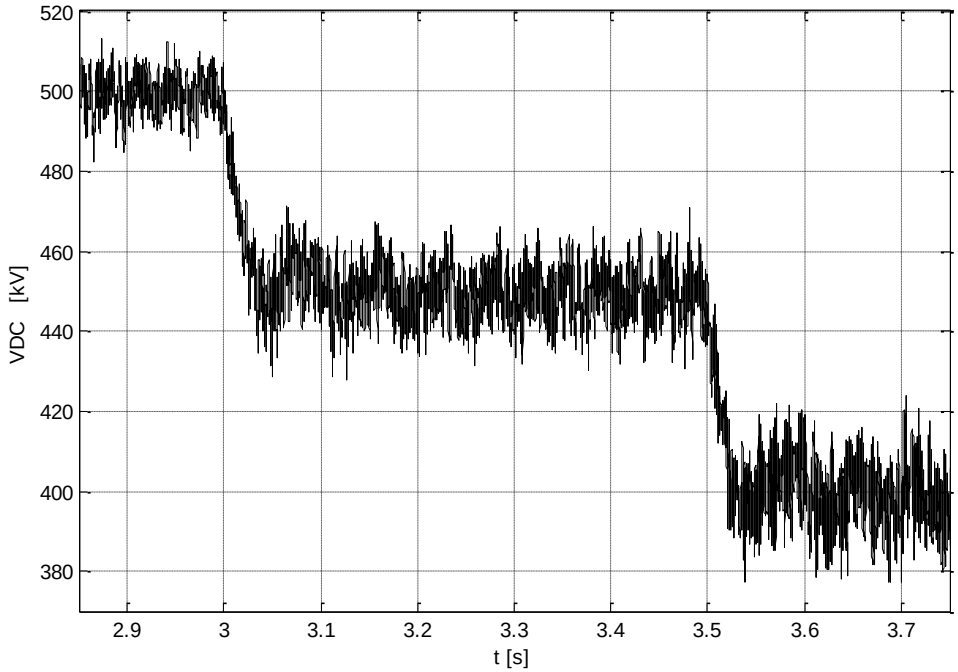

Figura 5.19: Tensão DC no terminal inversor.

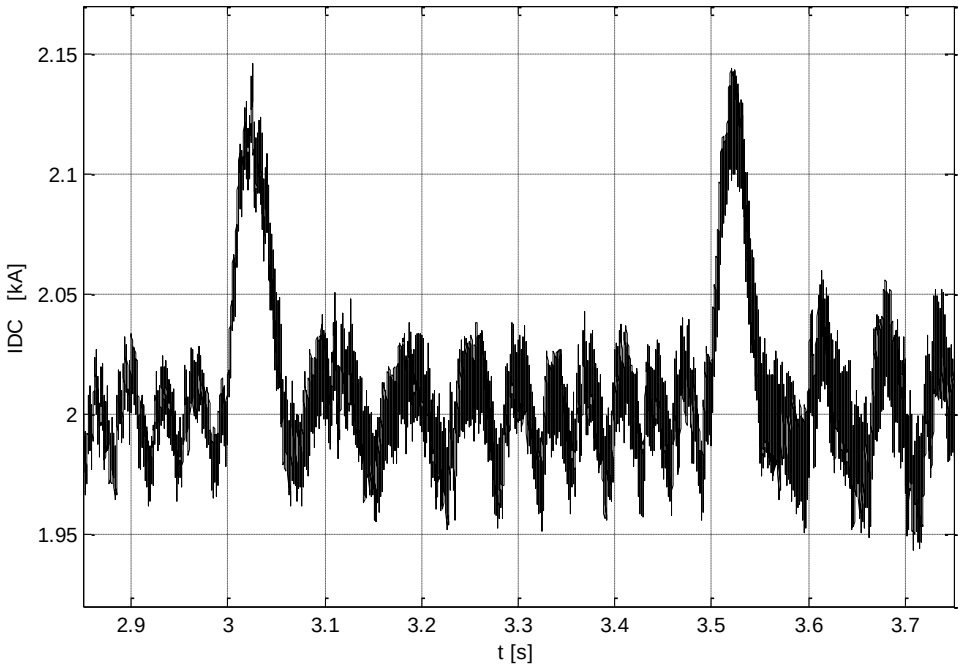

Figura 5.20: Corrente DC no terminal inversor

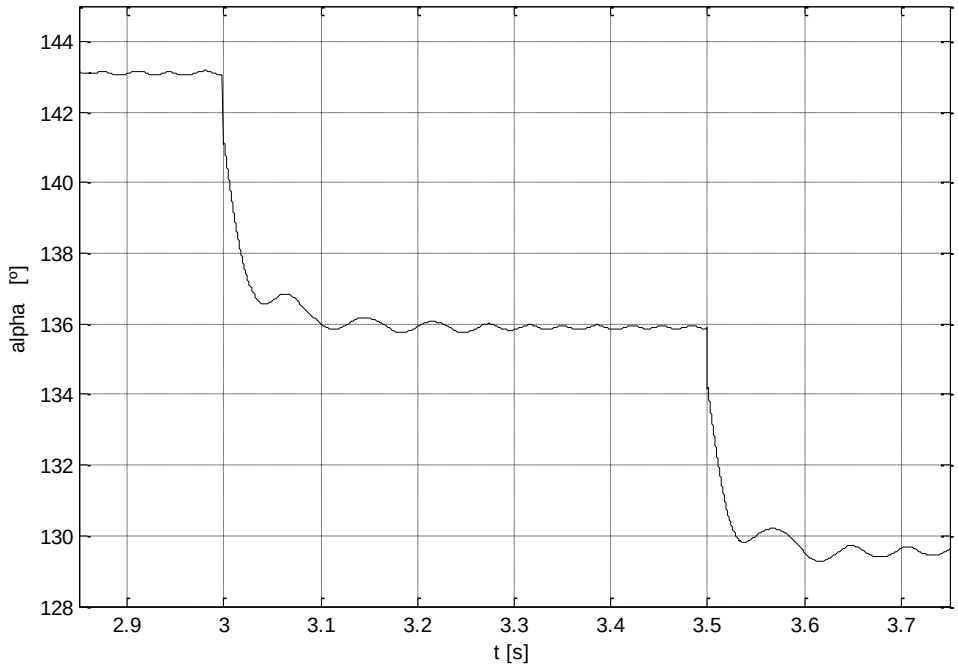

Figura 5.21: Ângulo de disparo para o inversor

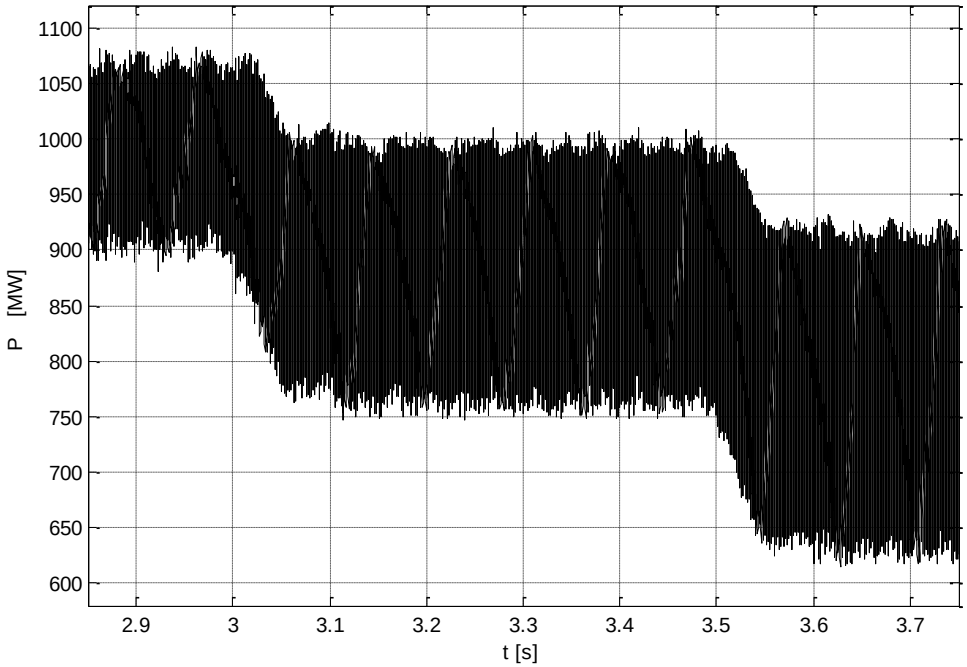

Figura 5.22: Potência ativa não filtrada no terminal inversor

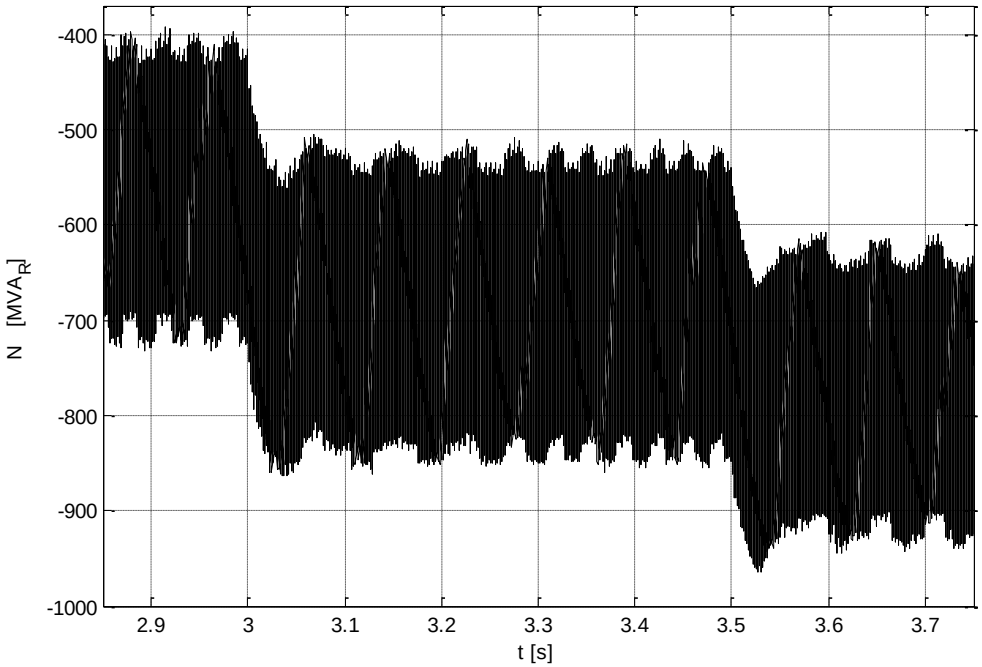

Figura 5.23: Potência reativa não filtrada no terminal inversor

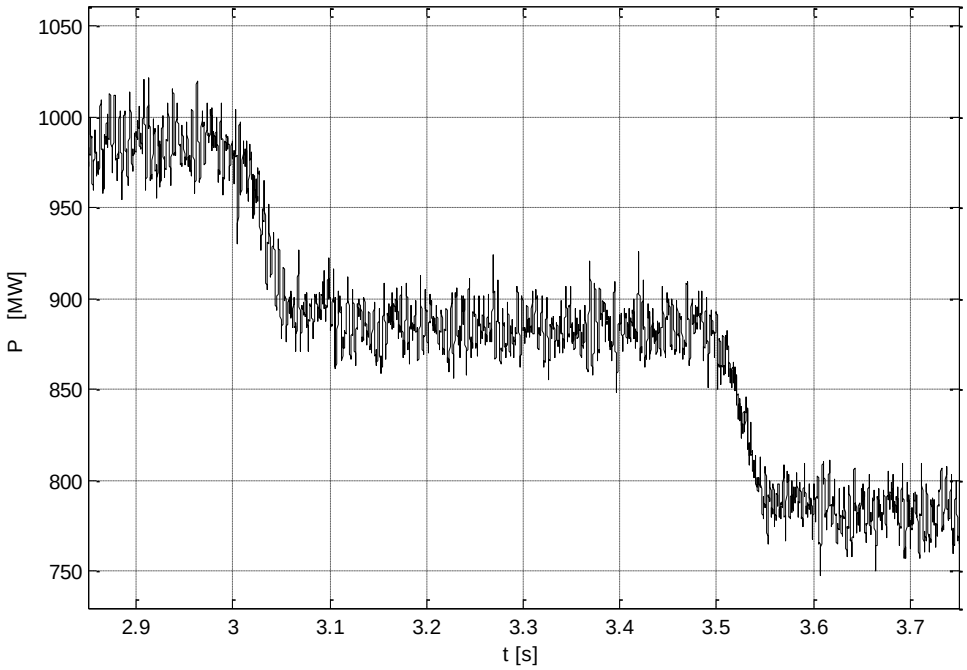

Figura 5.24: Potência ativa filtrada no terminal inversor

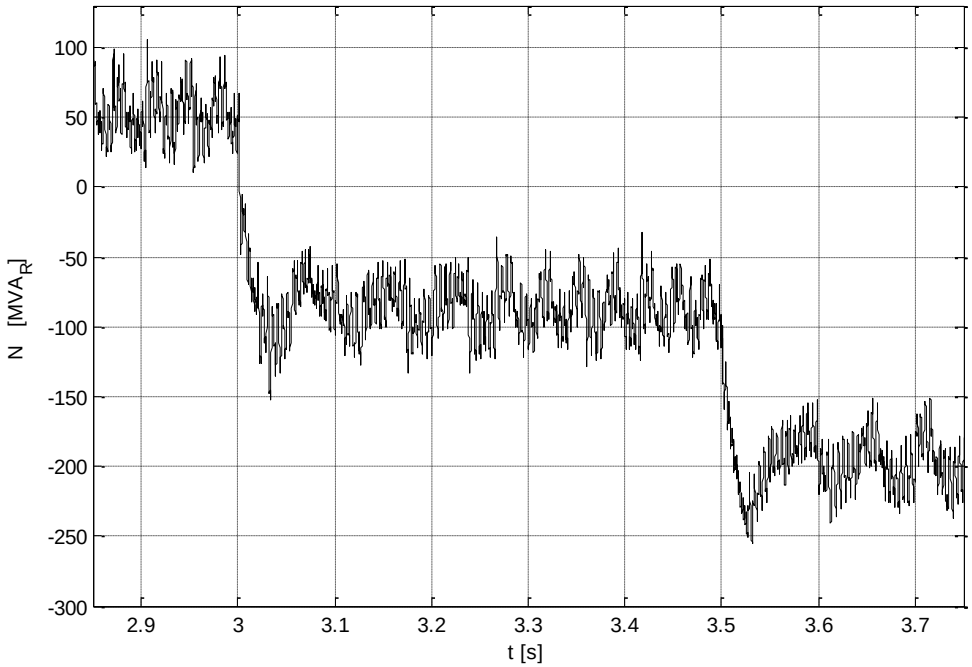

Figura 5.25: Potência reativa filtrada no terminal inversor

Para o retificador, P>0 indica potência ativa consumida da rede 60Hz, portanto transmitida pelo link DC, e Q>0 indica potência reativa "consumida" para manter o funcionamento da ponte retificadora. Para o inversor, P>0 indica potência ativa gerada para a rede 50Hz, portanto recebida pelo link DC, e Q>0 indica potência reativa "gerada" pelo inversor e entregue para a rede 50Hz.

Nas tabelas 5.1 e 5.2 são mostrados os valores do modelo do MATLAB e calculados, segundo o modelo clássico, de tensão de linha, corrente de linha, potência aparente, potência ativa, potência não-ativa, ângulo de carga, ângulo de disparo, corrente DC e tensão DC. Nota-se que o modelo clássico fornece resultados satisfatórios para o cálculo dos valores do modelo do MATLAB após o filtro. Para operação nominal, o filtro, embora tenha potência reativa de 544MVAr (600MVAr/500kV @476kV), gera efetivamente 573.92MVAr. Algumas das grandezas medidas apresentam altos níveis de ruído, os valores mostrados nas tabelas são valores médios calculados ao longo de um ciclo a partir do instante indicado.

Tabela 5.1: Grandezas medidas (simuladas pelo MATLAB) e calculadas (modelo clássico) para o terminal retificador, operação nominal, @ 2s, @ 3.4s, @ 3.8s e 60Hz.

	V NOMINAL		90% V NOMINAL		80% V NOMINAL	
	MATLAB	Clássico	MATLAB	Clássico	MATLAB	Clássico
$V_L \quad [kV]$	476.1	476.1	462.7	462.7	455.1	455.1
$I_L \quad [kA]$	1.385	1.385	1.399	1.399	1.075	1.075
$S_{3\phi} \quad [MVA]$	1142.3	1142.3	1121.8	1121.8	1086.0	1086.0
$P_{3\phi} \quad [MW]$	1029.9	1048.4	933.0	957.3	826.5	851.0
$N_{3\phi} \quad [MVA_R]$	494.0	453.5	622.7	584.7	704.6	674.8
$\phi \quad [^o]$	25.04	23.39	33.32	31.41	40.39	38.41
$\alpha_R \quad [^o]$	16.26	16.26	26.20	26.20	34.160	34.160
$I_{DC} \quad [kA]$	1.994	1.999	2.013	2.019	1.984	1.988
$V_{DC} \quad [kV]$	509.7	524.6	455.6	474.0	409.9	428.0

Tabela 5.2: Grandezas medidas (simuladas pelo MATLAB) e calculadas (modelo clássico) para o terminal inversor, operação nominal, @ 2s, @ 3.4s, @ 3.8s e 50Hz.

	V NOMINAL		90% V NOMINAL		80% V NOMINAL	
	MATLAB	Clássico	MATLAB	Clássico	MATLAB	Clássico
$V_L \quad [kV]$	351.6	351.6	346.2	351.6	342.6	342.6
$I_L \quad [kA]$	1.879	1.879	1.895	1.879	1.867	1.867
$S_{3\phi} \quad [MVA]$	1144.1	1144.1	1136.5	1136.5	1107.6	1136.5
$P_{3\phi} \quad [MW]$	984.8	1003.6	887.4	906.0	780.5	794.0
$N_{3\phi} \quad [MVA_R]$	-582.4	-549.3	-710.5	-686.2	-785.8	-772.2
$\phi \quad [^o]$	-29.66	-28.69	-37.82	-37.14	-44.96	-44.20
$\alpha_I \quad [^o]$	143.1	143.1	135.9	135.9	129.6	129.6
$I_{DC} \quad [kA]$	1.997	1.995	2.011	2.013	1.983	1.982
$V_{DC} \quad [kV]$	499.8	503.1	447.8	450.2	400.5	400.5

5.3 Simulação com valores distintos de corrente DC

O sistema também foi simulado para condições distintas de corrente DC, o conteúdo harmônico e as formas de onda de tensão de fase e corrente de fase não sofreram alterações significativas.

As figuras 5.26 a 5.39 são análogas às da seção anterior. Duas condições de operação foram simuladas, cada uma com um nível distinto de corrente DC, 75% e 50% da corrente DC nominal. Nesses casos, as reduções da potência ativa e reativa dos conversores acarretam uma “sobra” de potência reativa do filtro, tornando capacitivo o sistema conversores/filtros.

Nas tabelas 5.3 a 5.4 são mostrados os valores do modelo do MATLAB e do modelo clássico, da tensão de linha, corrente de linha, potência aparente, potência ativa, potência não-ativa, ângulo de carga, ângulo de disparo, corrente DC e tensão DC. Nesse caso, o modelo clássico também fornece resultados satisfatórios para o cálculo dos valores do modelo do MATLAB antes do filtro.

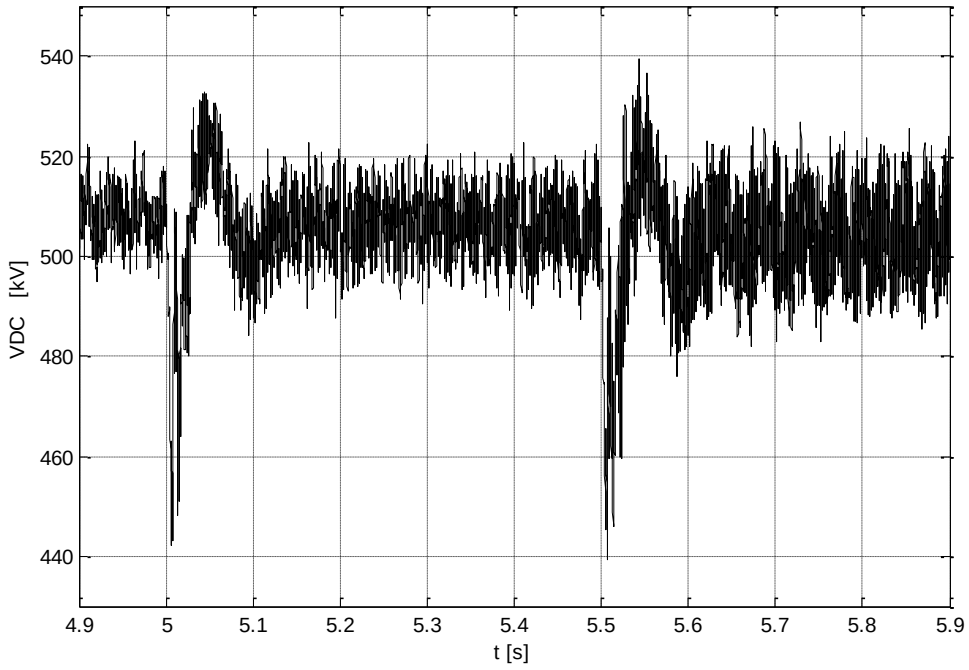

Figura 5.26: Tensão DC no terminal retificador.

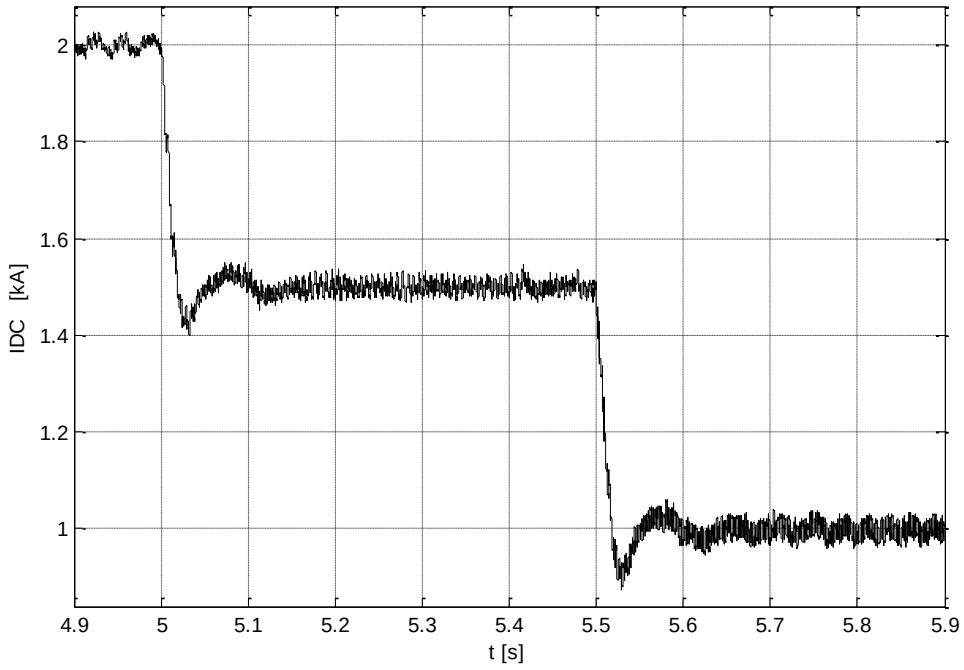

Figura 5.27: Corrente DC no terminal retificador

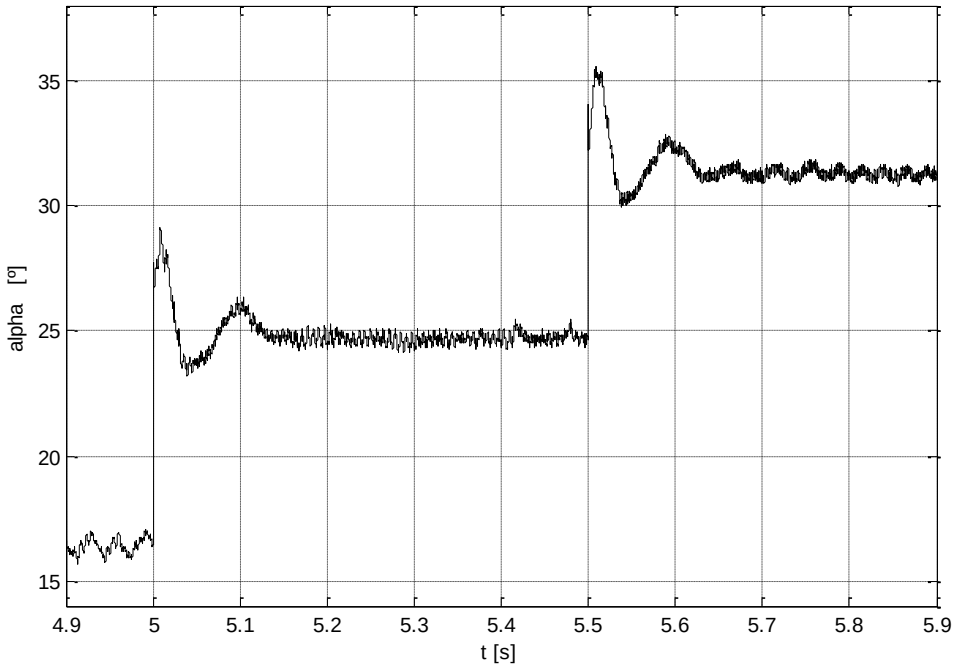

Figura 5.28: Ângulo de disparo do retificador

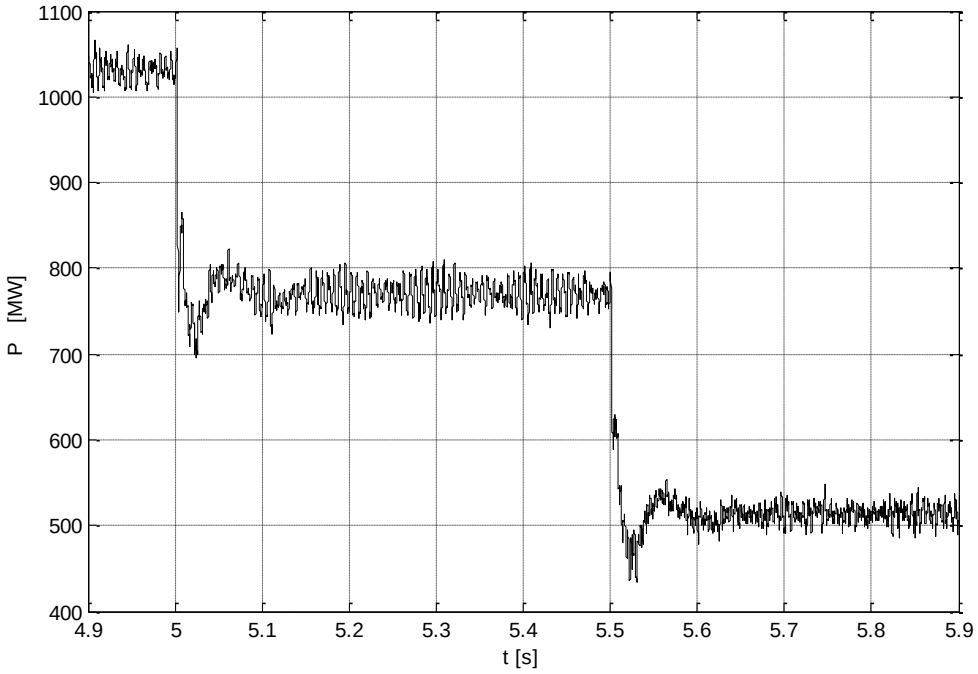

Figura 5.29: Potência ativa filtrada no terminal retificador.

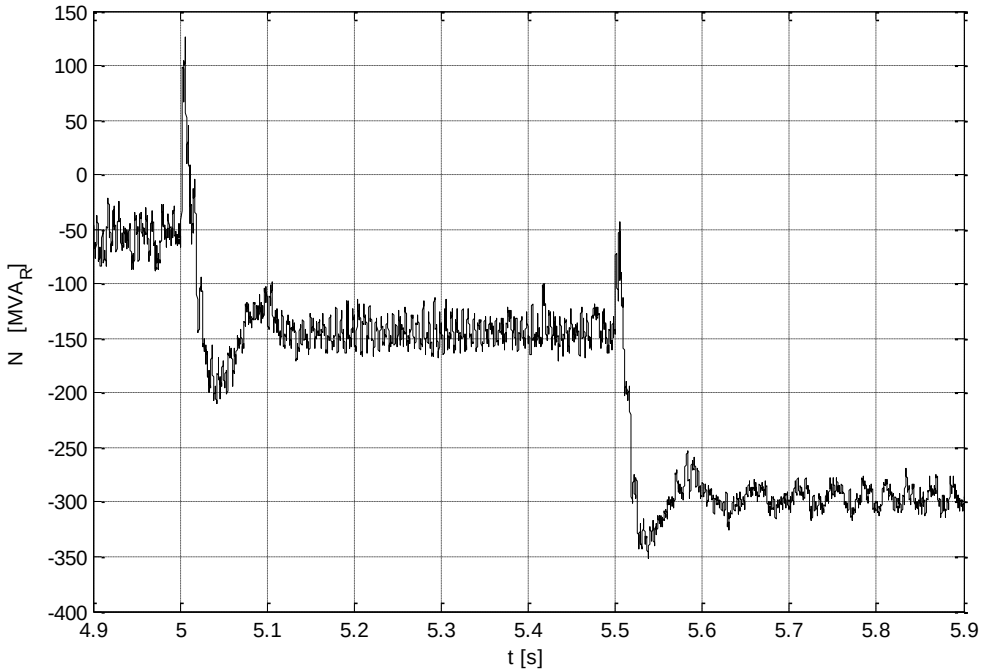

Figura 5.30: Potência reativa filtrada no terminal retificador.

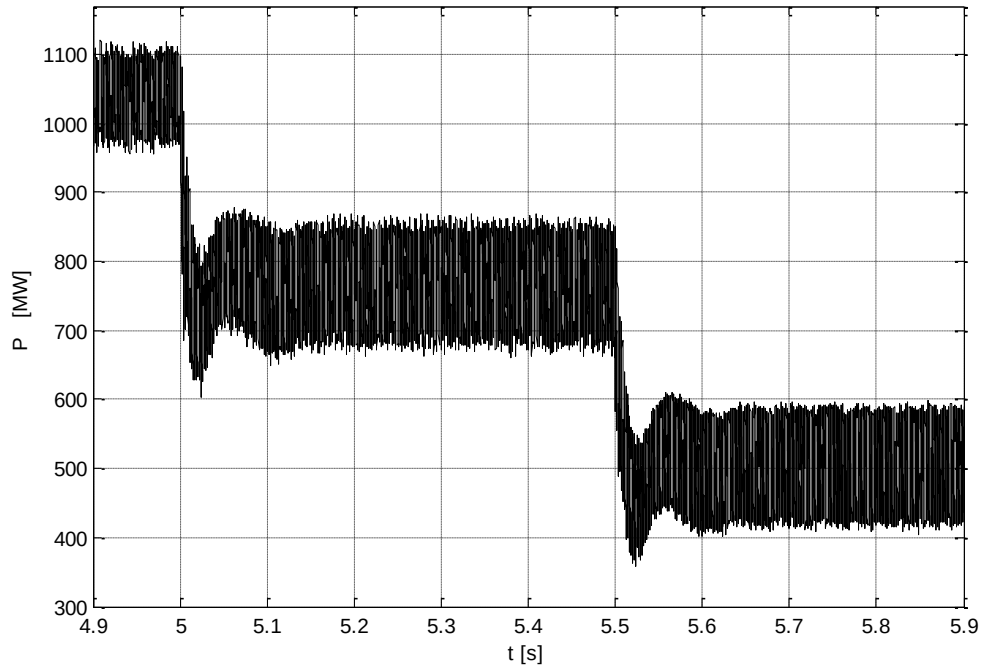

Figura 5.31: Potência ativa não filtrada no terminal retificador.

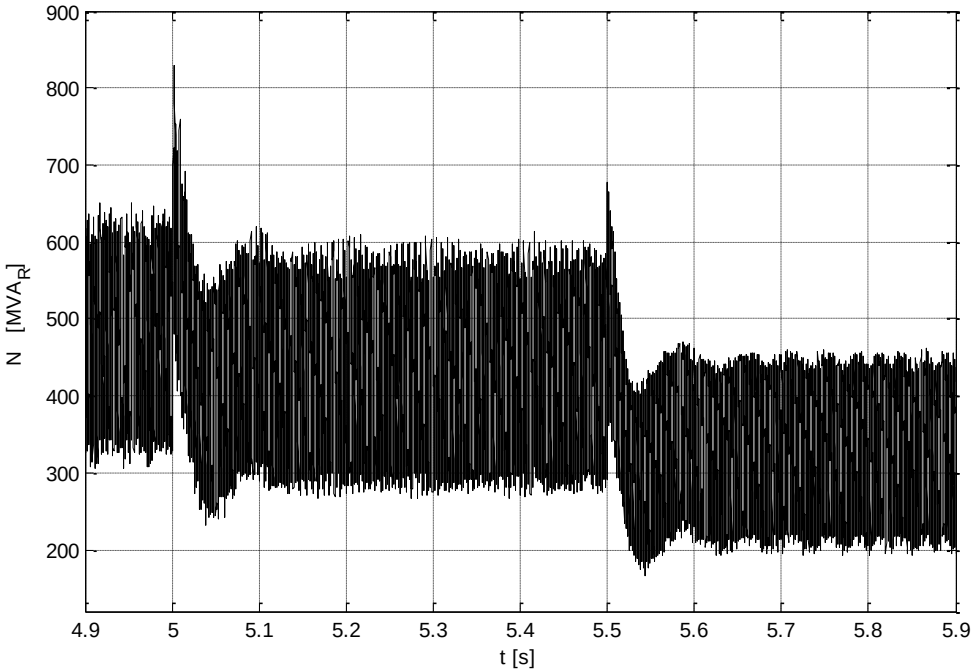

Figura 5.32: Potência reativa não filtrada no terminal retificador.

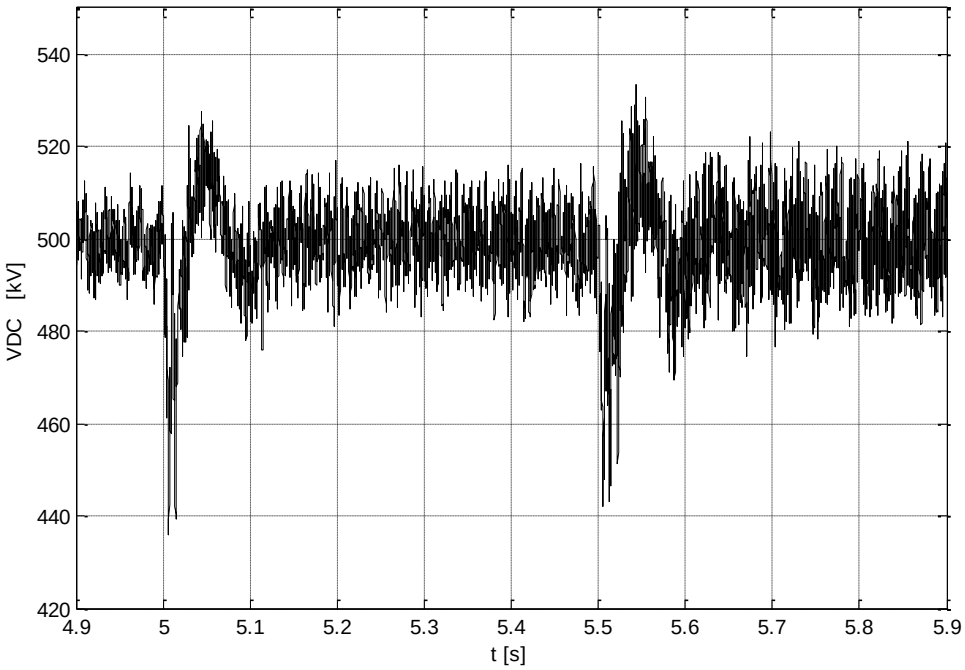

Figura 5.33: Tensão DC no terminal inversor.

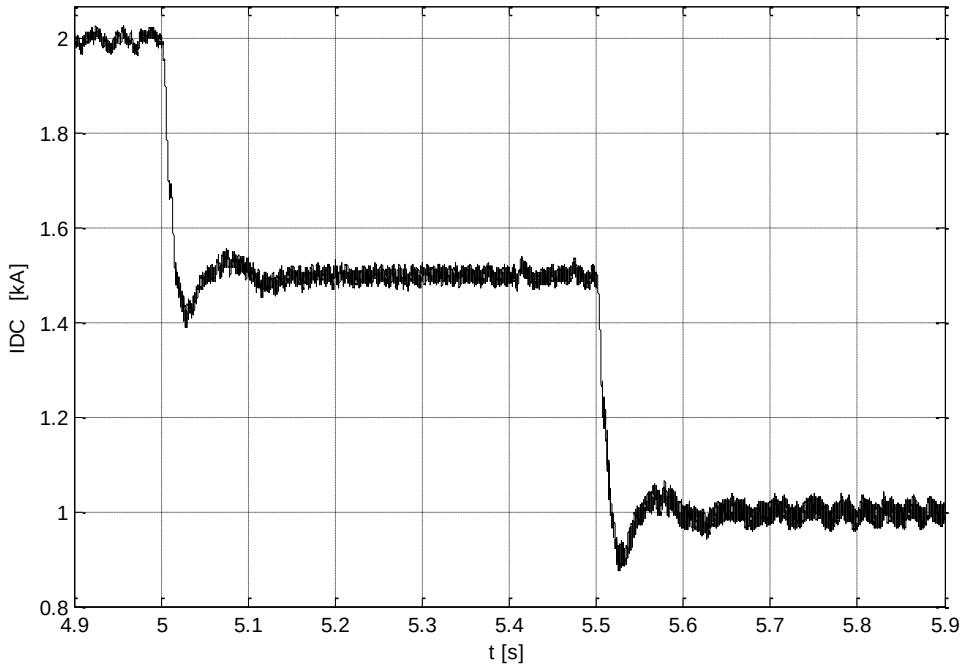

Figura 5.34: Corrente DC no terminal inversor.

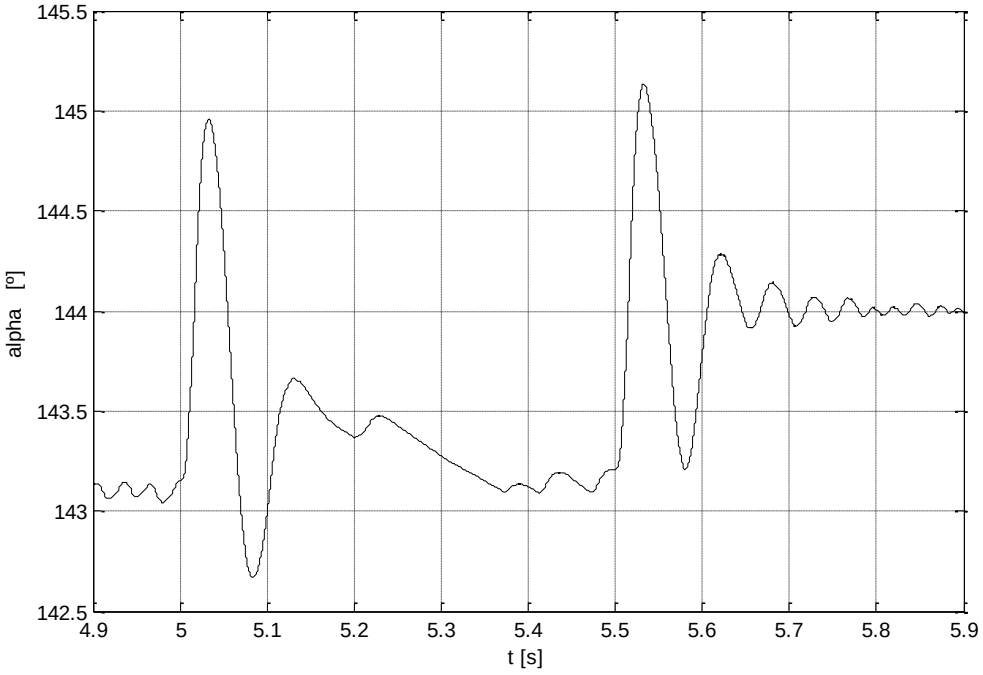

Figura 5.35: Ângulo de disparo no inversor.

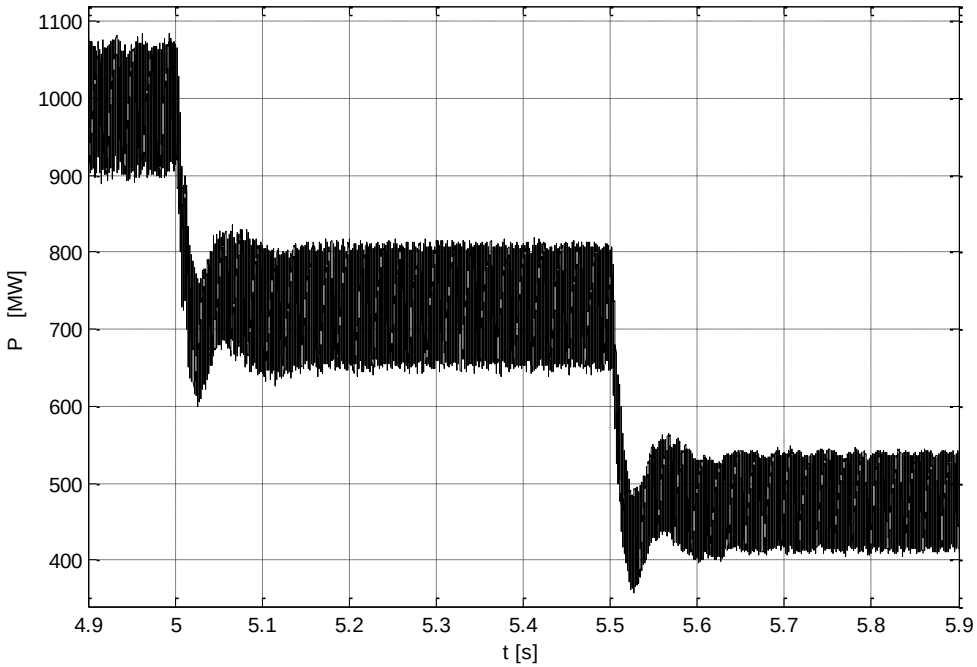

Figura 5.36: Potência ativa não filtrada no terminal inversor.

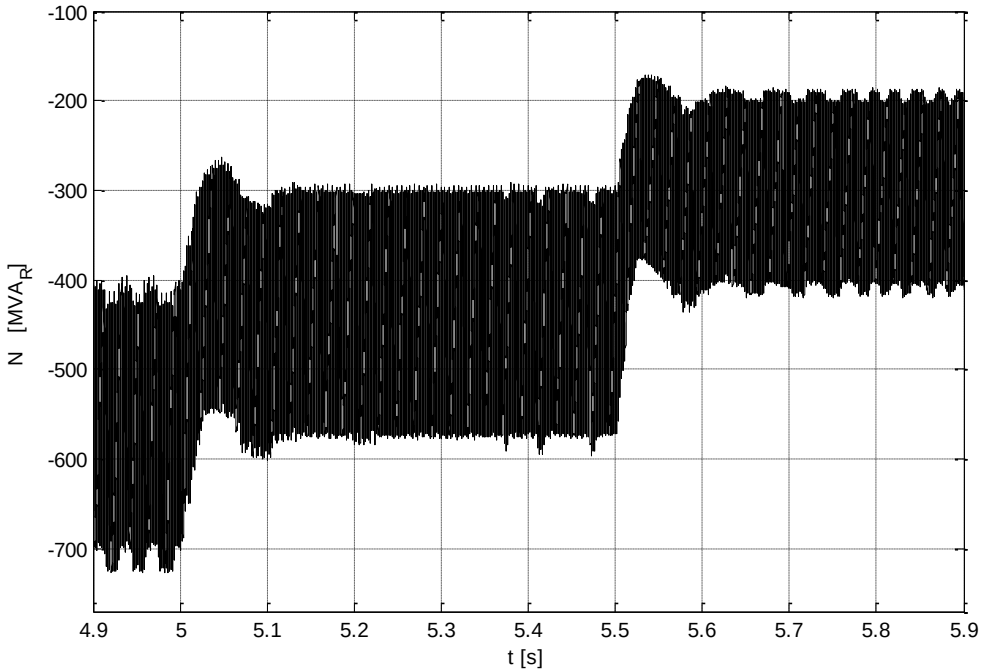

Figura 5.37: Potência reativa não filtrada no terminal inversor.

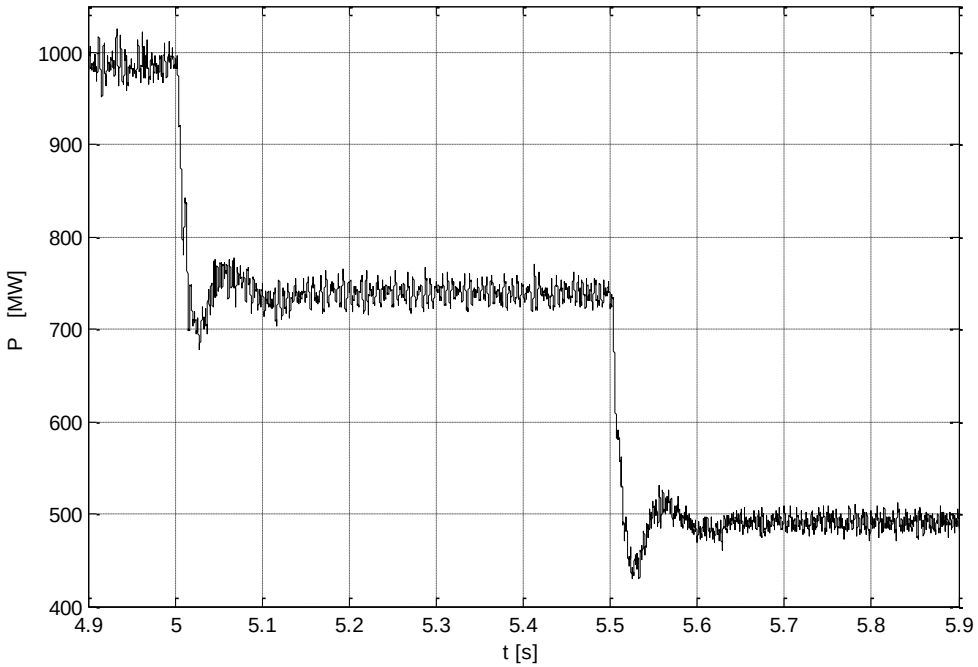

Figura 5.38: Potência ativa filtrada no terminal inversor.

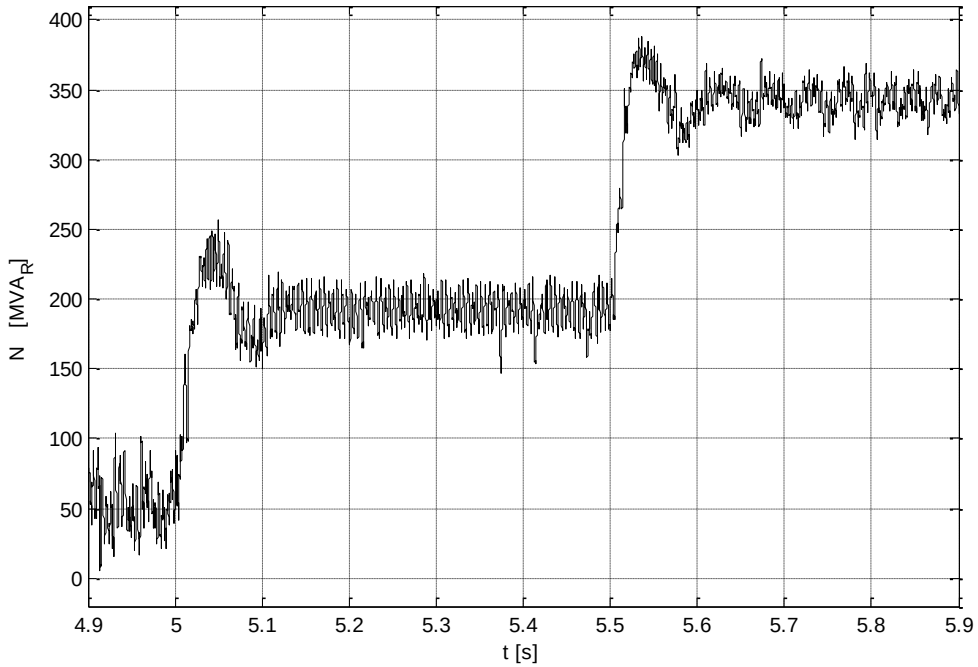

Figura 5.39: Potência reativa filtrada no terminal inversor.

Tabela 5.3: Grandezas medidas (simuladas pelo MATLAB) e calculadas (modelo clássico) para o terminal retificador, corrente reduzida, @ 5.4s, @ 5.8s e 60Hz.

	75% I NOMINAL		50% I NOMINAL	
	MATLAB	Clássico	MATLAB	Clássico
$V_L \quad [kV]$	494.9	494.9	516.7	516.7
$I_L \quad [kA]$	1.044	1.044	0.7006	0.7006
$S_{3\phi} \quad [MVA]$	895.2	895.2	627.1	627.1
$P_{3\phi} \quad [MW]$	772.9	786.0	515.0	523.5
$N_{3\phi} \quad [MVA_R]$	451.7	428.6	357.8	345.2
$\phi \quad [^o]$	29.99	28.60	33.74	33.40
$\alpha_R \quad [^o]$	24.69	24.69	31.30	31.30
$I_{DC} \quad [kA]$	1.502	1.507	1.002	1.011
$V_{DC} \quad [kV]$	505.4	521.5	503.5	517.8

Tabela 5.4: Grandezas medidas (simuladas pelo MATLAB) e calculadas (modelo clássico) para o terminal inversor, corrente reduzida, @ 5.4s, @ 5.8s e 50Hz.

	75% I NOMINAL		50% I NOMINAL	
	MATLAB	Clássico	MATLAB	Clássico
$V_L \quad [kV]$	354.8	354.8	358.7	358.7
$I_L \quad [kA]$	1.416	1.416	0.9419	0.9419
$S_{3\phi} \quad [MVA]$	870.1	870.1	585.3	585.3
$P_{3\phi} \quad [MW]$	739.7	746.2	492.0	496.0
$N_{3\phi} \quad [MVA_R]$	-458.2	-447.5	-317.0	-311.1
$\phi \quad [^o]$	-30.91	-30.95	-31.89	-32.11
$\alpha_I \quad [^o]$	143.1	143.1	144.0	144.0
$I_{DC} \quad [kA]$	1.505	1.503	1.002	1.000
$V_{DC} \quad [kV]$	498.5	496.4	500.0	495.6

5.4 Simulação de uma falta AC na rede 50Hz

O circuito também foi simulado com um curto circuito trifásico na rede 50Hz, a resistência de falta foi arbitrada em 2Ω. A falta ocorre entre os instantes 7s e 8.5s. As tensões de fase e correntes de fase são mostradas nas figuras 5.40 a 5.43. As demais figuras são análogas às das seções anteriores. Nesse caso, a redução no nível da tensão AC na rede de 50Hz impede que o inversor opere com a tensão no link DC no valor nominal, isso afeta o controle no retificador, a corrente no link DC, a potência DC e o suporte de reativos do filtro.

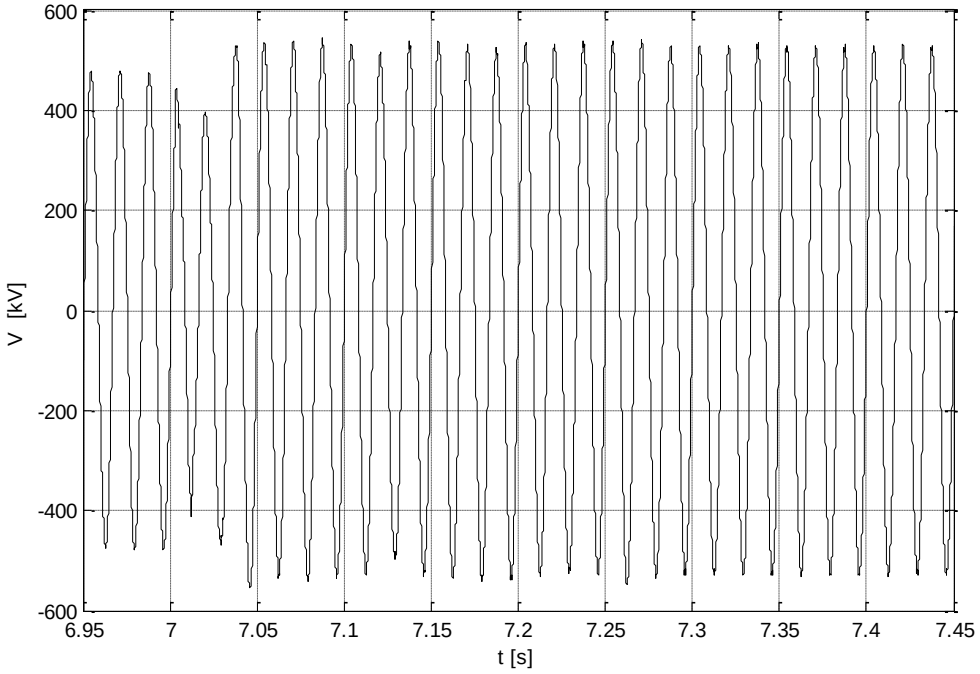

Figura 5.40: Tensão AC na rede de 60Hz.

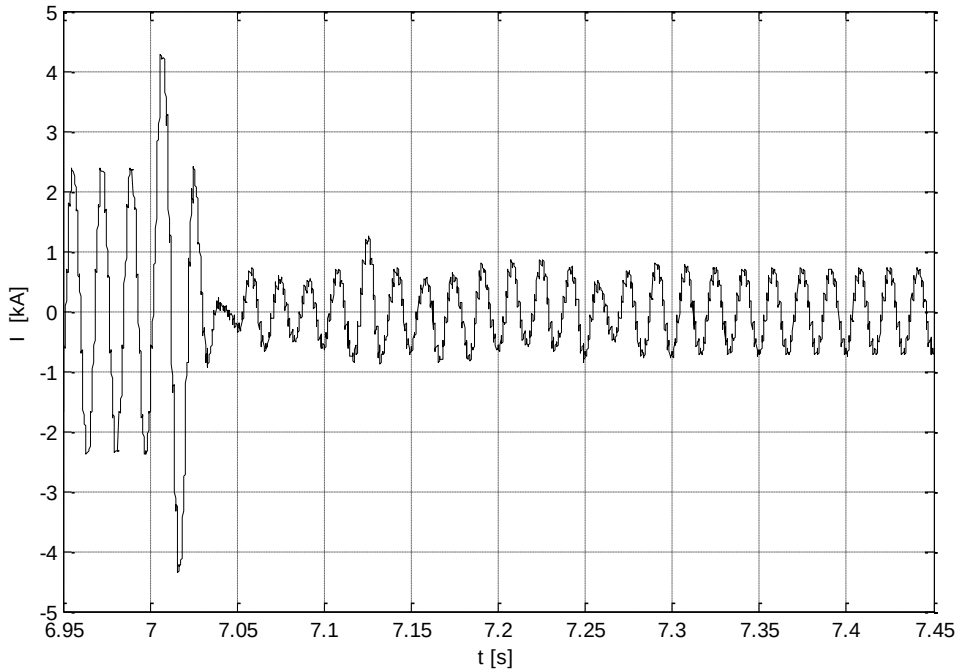

Figura 5.41: Corrente AC na rede de 60Hz.

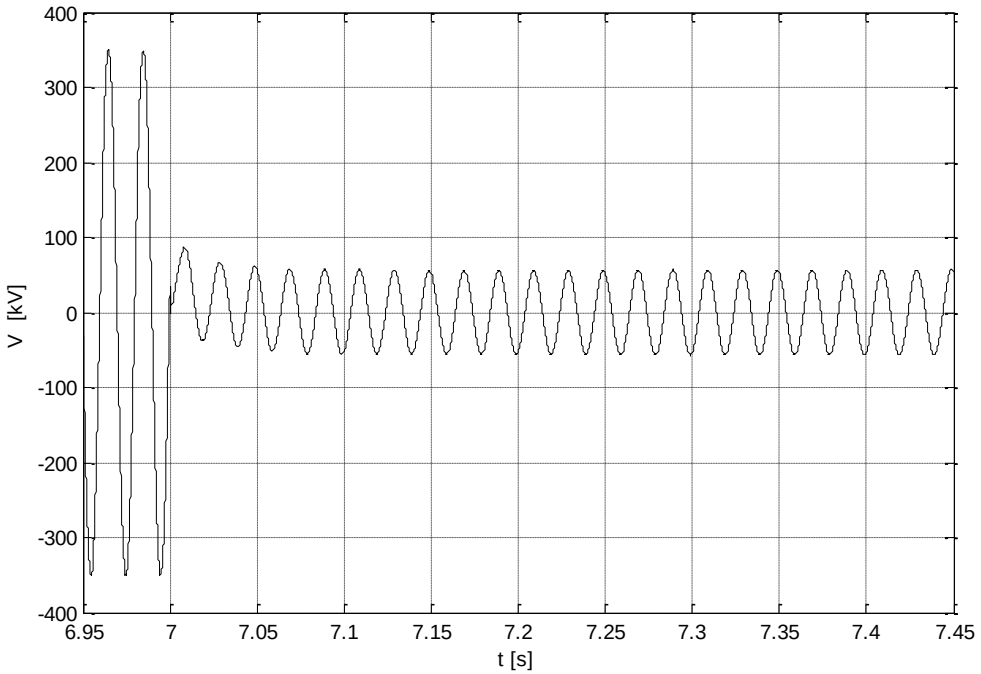

Figura 5.42: Tensão AC na rede de 50Hz.

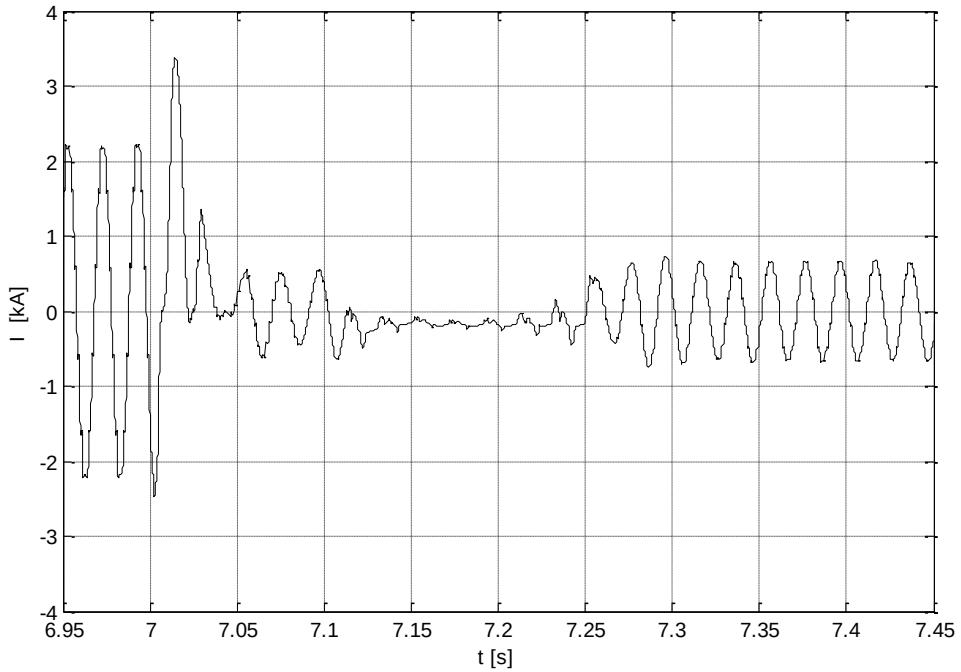

Figura 5.43: Corrente AC na rede de 50Hz.

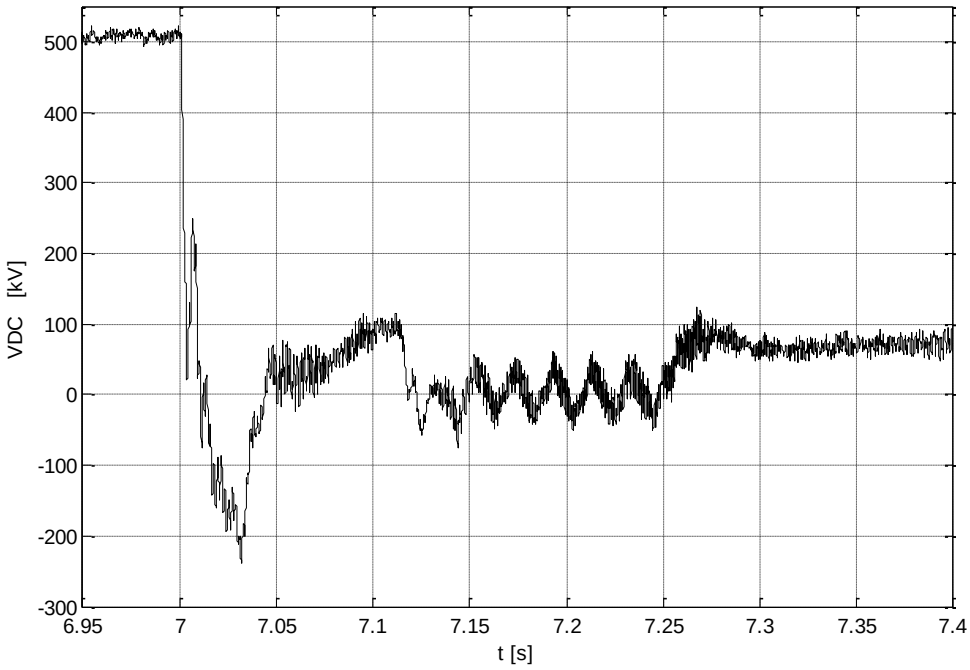

Figura 5.44: Tensão DC no terminal retificador.

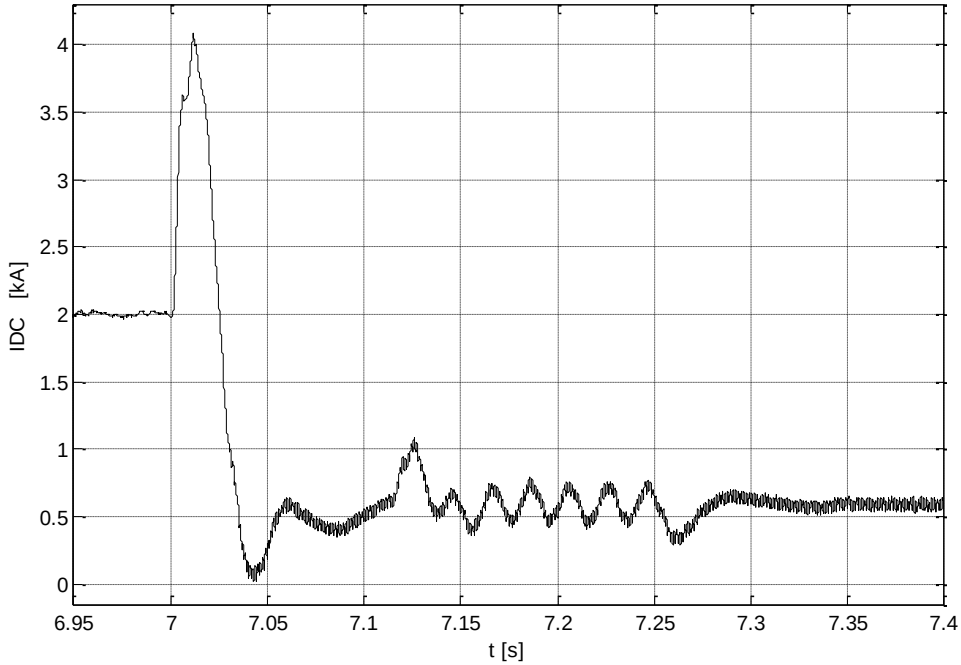

Figura 5.45: Corrente DC no terminal retificador.

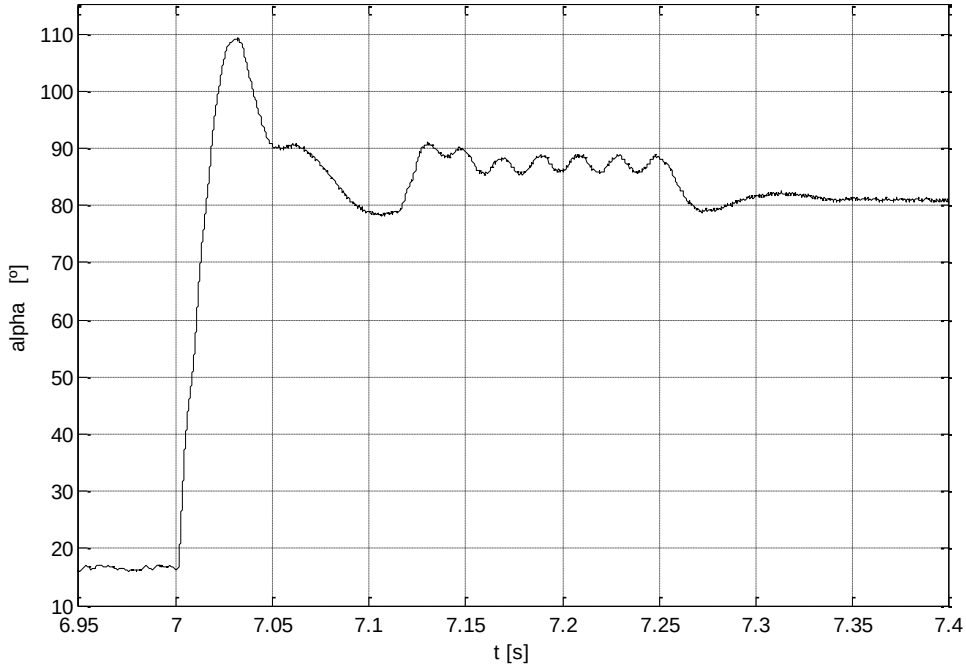

Figura 5.46: Ângulo de disparo no retificador

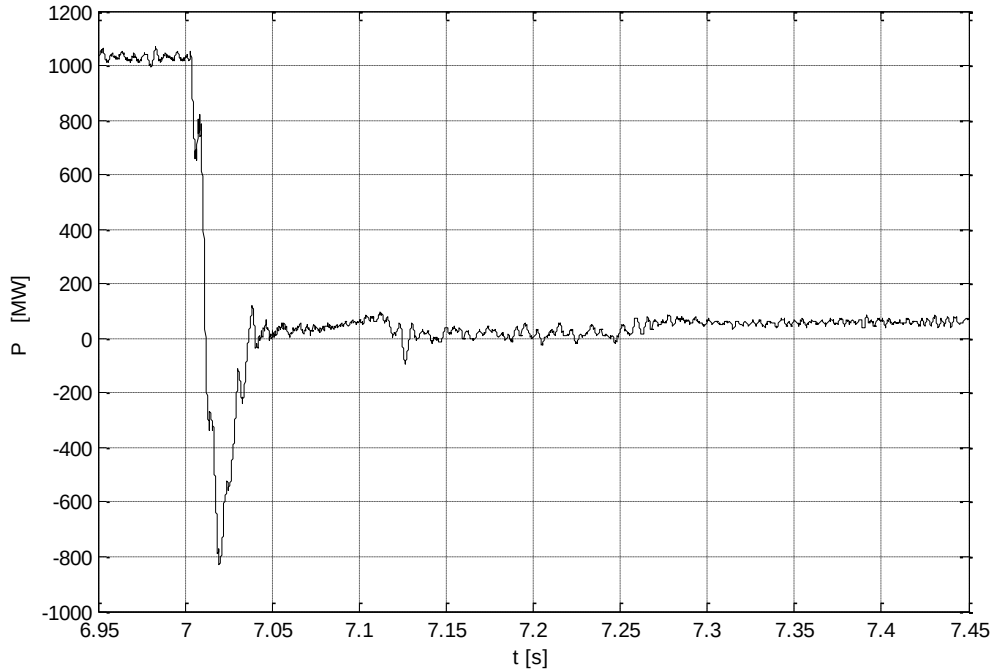

Figura 5.47: Potência ativa filtrada no terminal retificador.

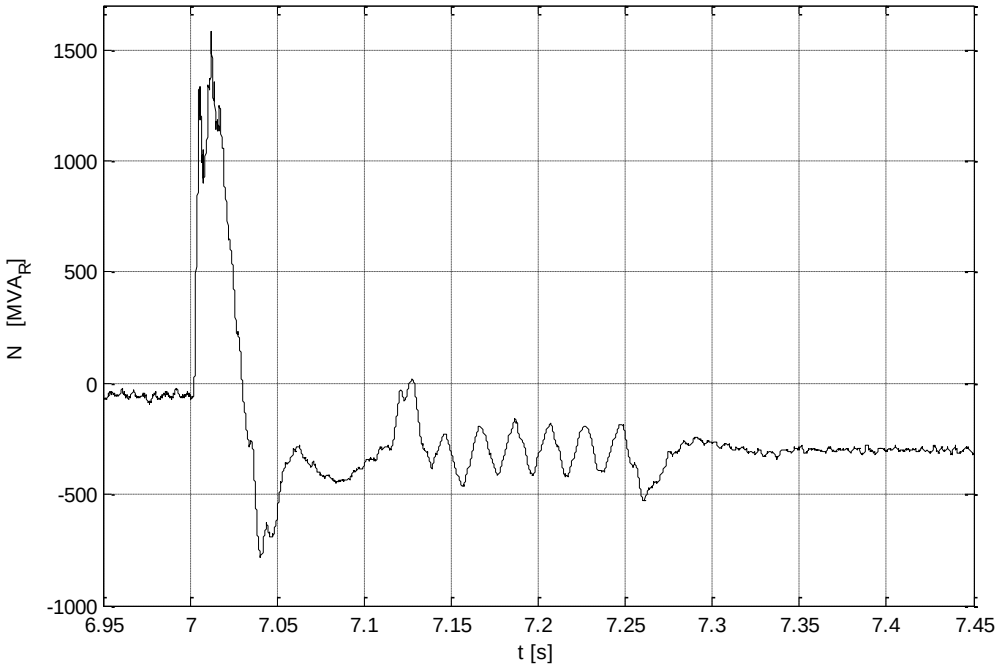

Figura 5.48: Potência reativa filtrada no terminal retificador.

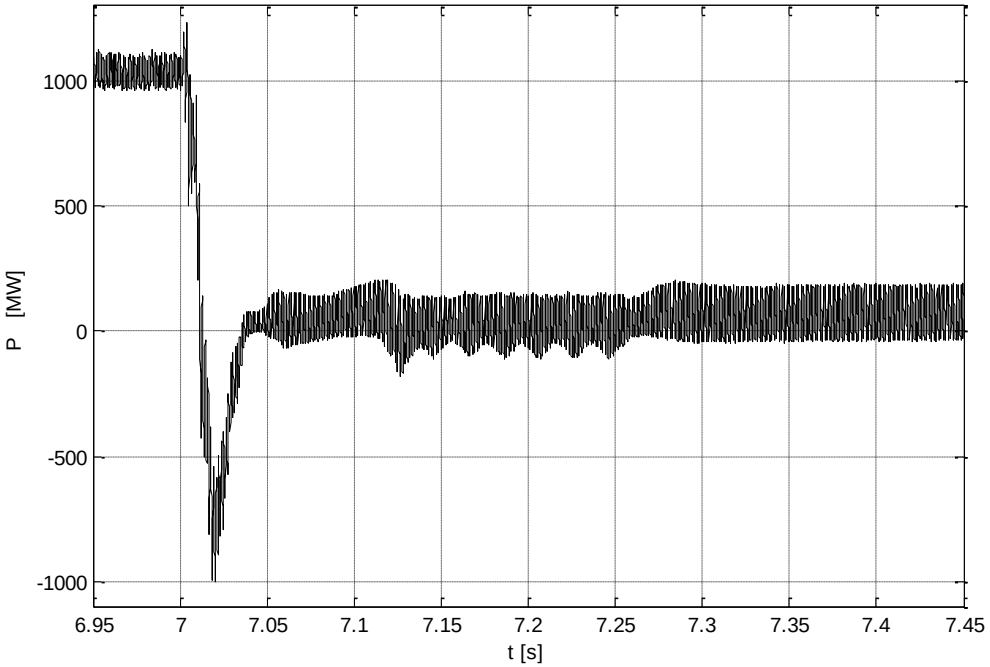

Figura 5.49: Potência ativa não filtrada no terminal retificador.

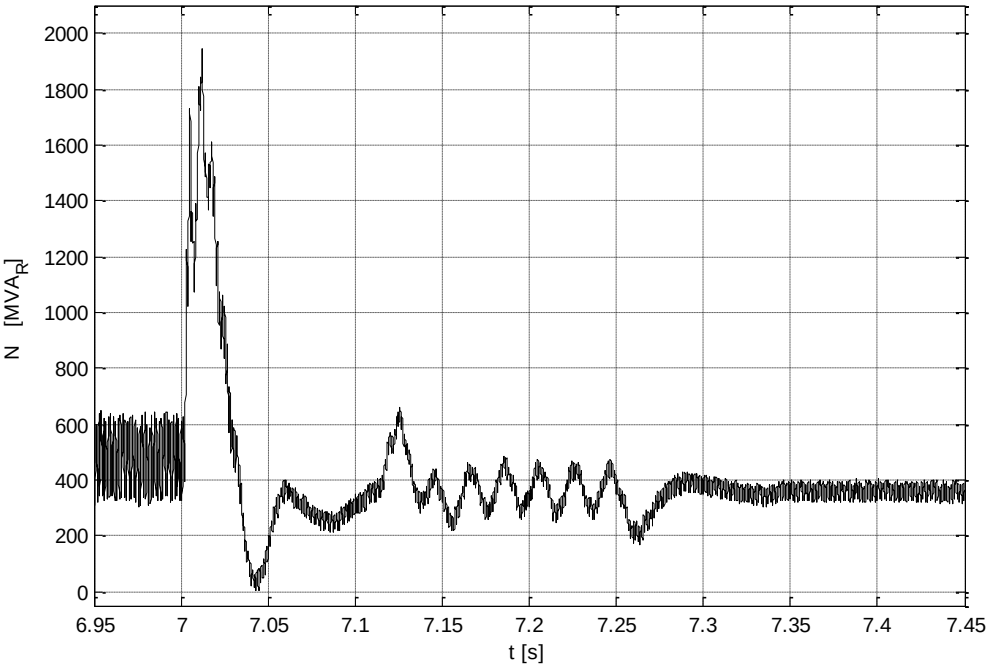

Figura 5.50: Potência reativa não filtrada no terminal retificador.

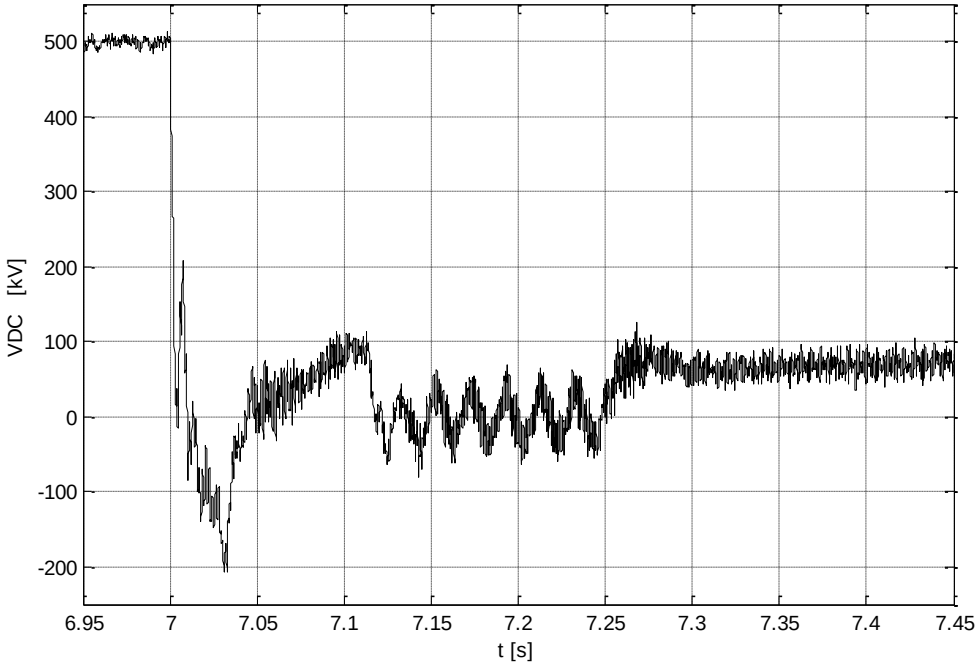

Figura 5.51: Tensão DC no terminal inversor.

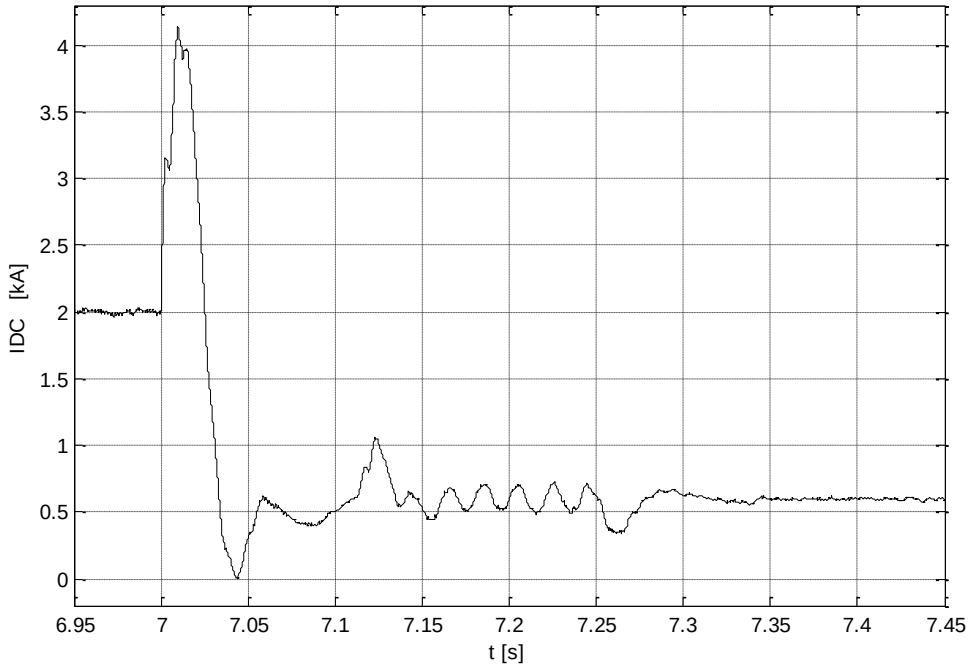

Figura 5.52: Corrente DC no terminal inversor.

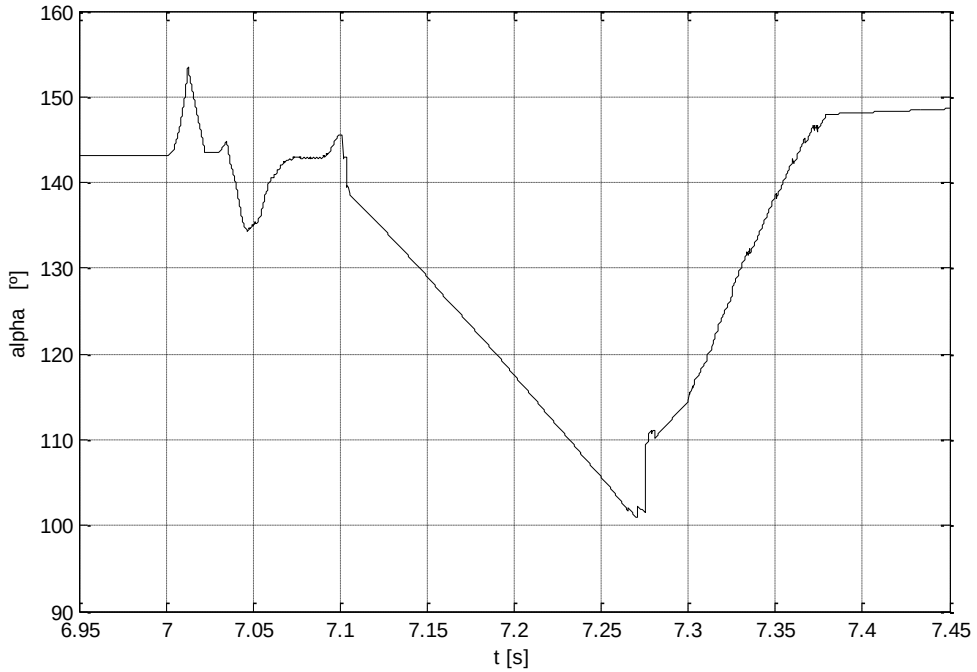

Figura 5.53: Ângulo de disparo no inversor.

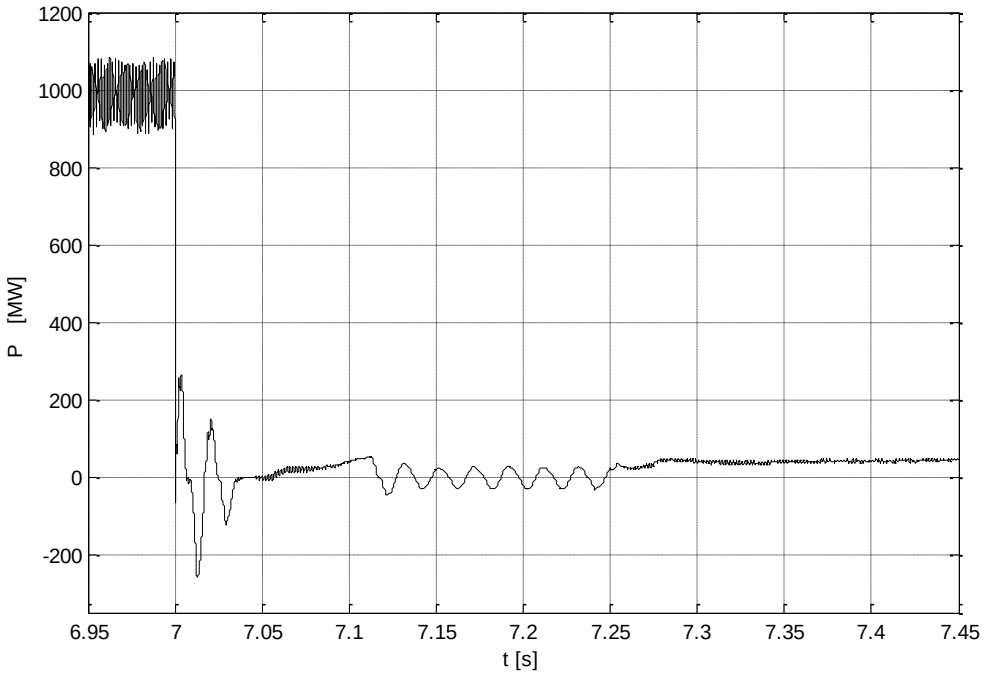

Figura 5.54: Potência ativa não filtrada no terminal inversor.

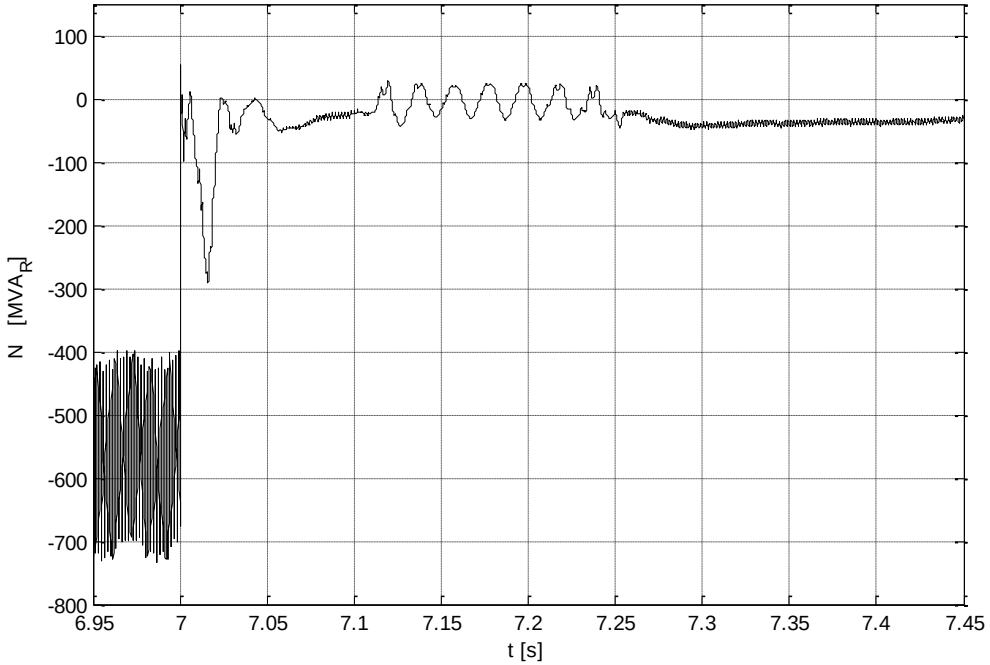

Figura 5.55: Potência reativa não filtrada no terminal inversor.

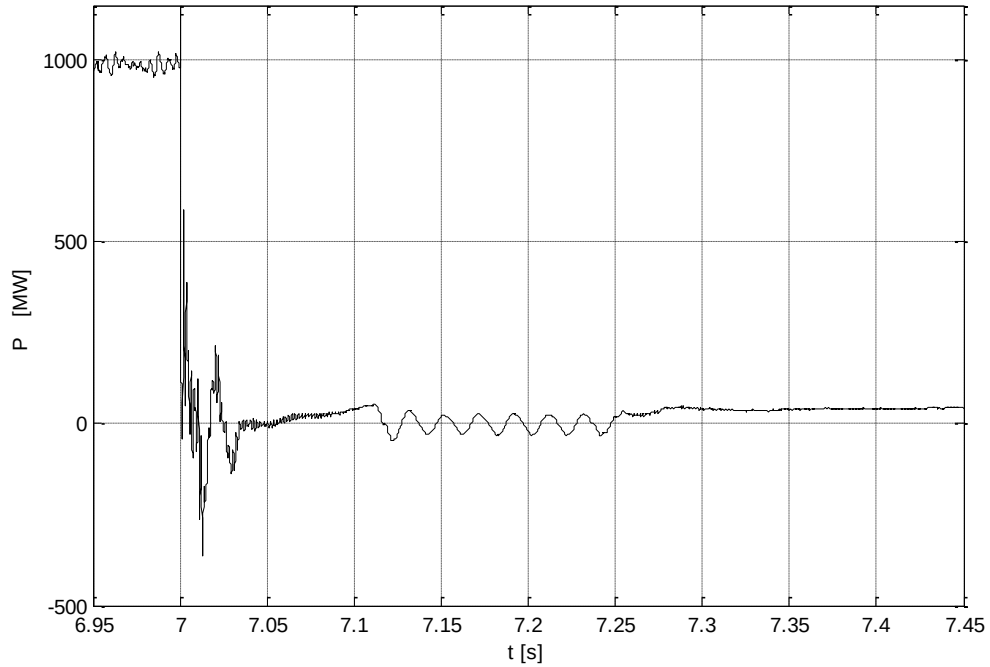

Figura 5.56: Potência ativa filtrada no terminal inversor.

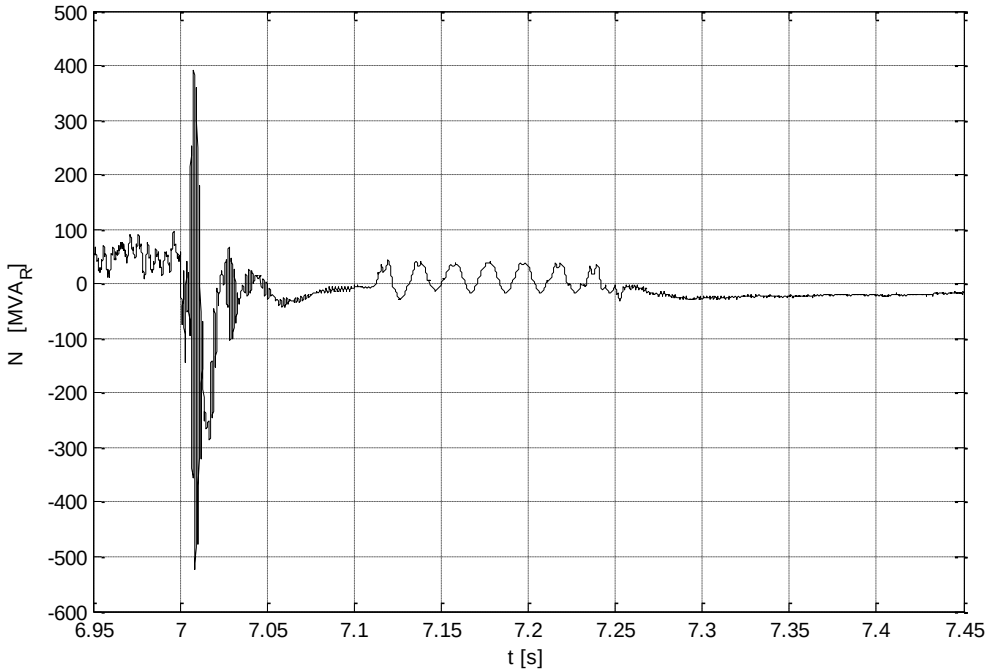

Figura 5.57: Potência reativa filtrada no terminal inversor.

5.5 Simulação com valores distintos de tensão DC com SVC

O mesmo circuito foi simulado, com tensão DC nominal, 90% e 80% da tensão DC nominal, trocando o banco de capacitores por um SVC de potência nominal ±300MVAr. Para o espectro harmônico, as tensões de fase e correntes de fase foram praticamente as mesmas para o caso do SVC. As tensões e correntes foram medidas dos dois lados de cada filtro. O uso do SVC produziu praticamente o mesmo efeito que o banco de capacitores, como no caso anterior, eliminando os harmônicos e corrigindo o fator de potência dos conversores. Entretanto, como era de se esperar, a capacidade de ajustar a quantidade necessária de reativos permitiu uma melhor regulação da tensão nos terminais do link DC, já que o SVC é um regulador de tensão.

As figuras 5.58 a 5.64 mostram a tensão e corrente na entrada do link DC junto ao terminal retificador, o ângulo de disparo do retificador, α_R, a potência ativa e reativa (nos dois lados do filtro) no terminal retificador. As figuras 5.65 a 5.71 mostram a tensão e corrente na saída do link DC junto ao terminal inversor, o ângulo de disparo do inversor, α_I, a potência ativa e reativa (nos dois lados do filtro) no terminal inversor. As mesmas três condições de operação foram simuladas, cada uma com um nível distinto de tensão DC. O uso do SVC filtrou bem a potência ativa e reativa e nota-se que a potência reativa tem característica capacitiva para os conversores.

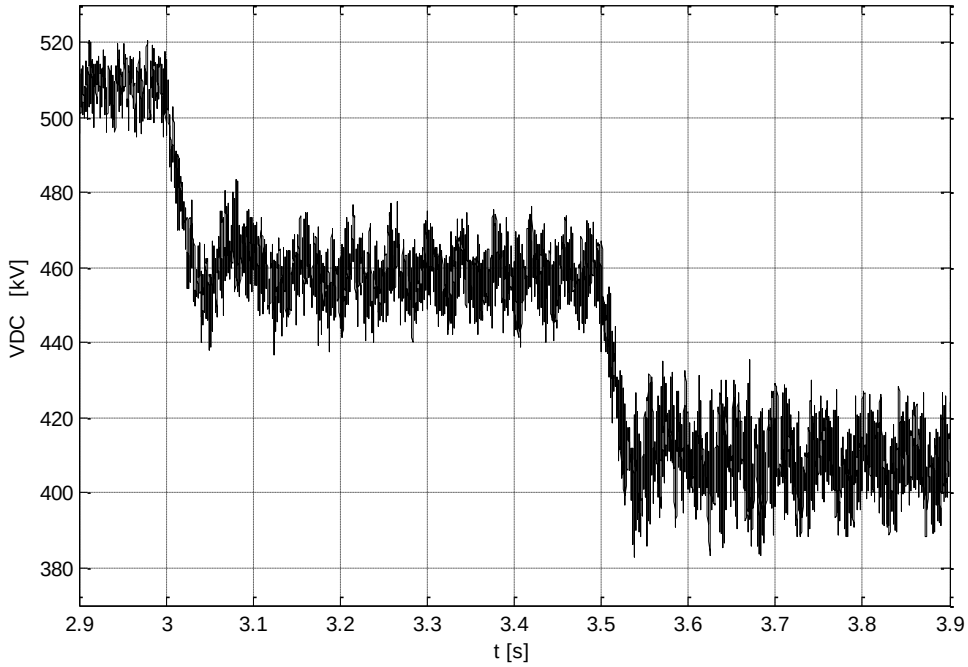

Figura 5.58: Tensão DC no terminal retificador com SVC.

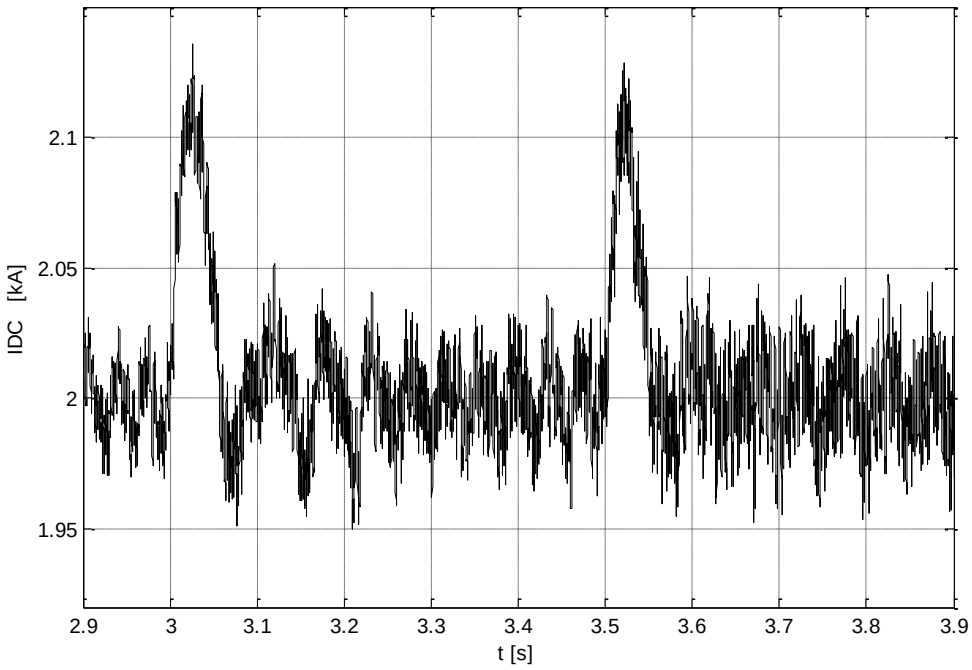

Figura 5.59: Corrente DC no terminal retificador com SVC.

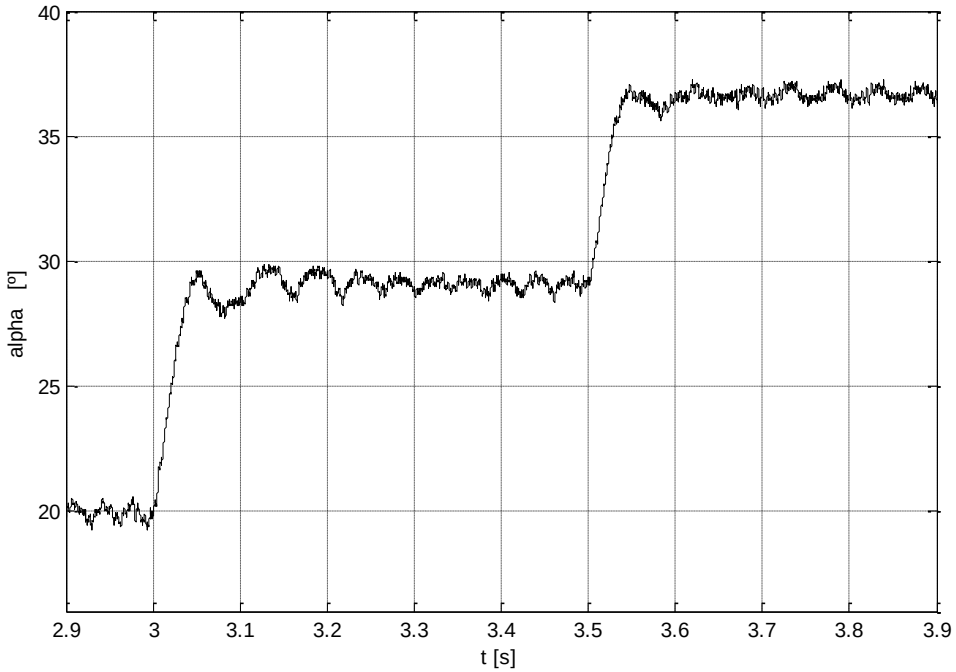

Figura 5.60: Ângulo de disparo no retificador com SVC.

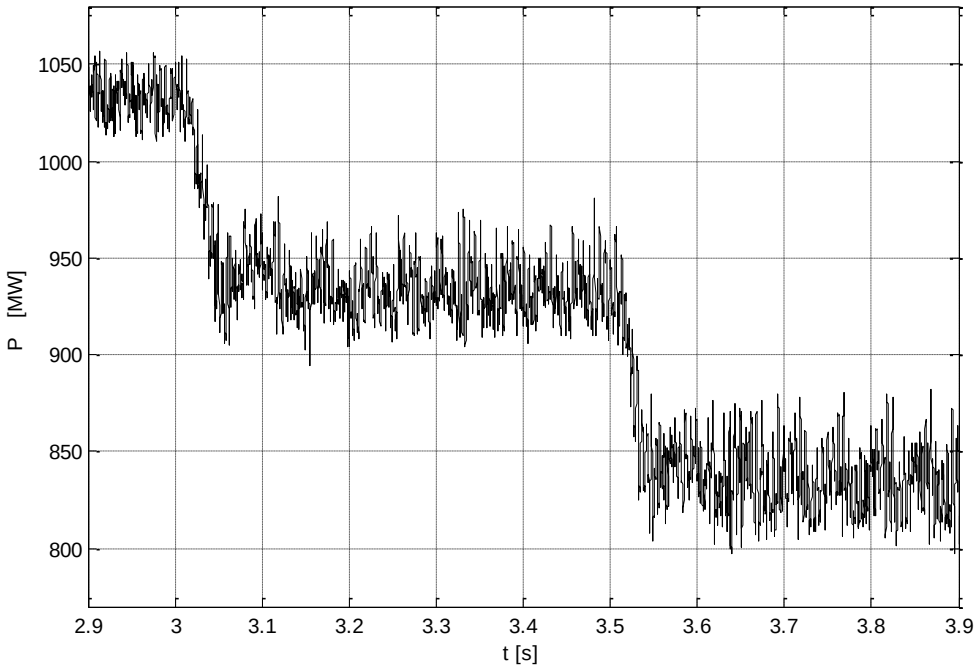

Figura 5.61: Potência ativa filtrada no terminal retificador com SVC.

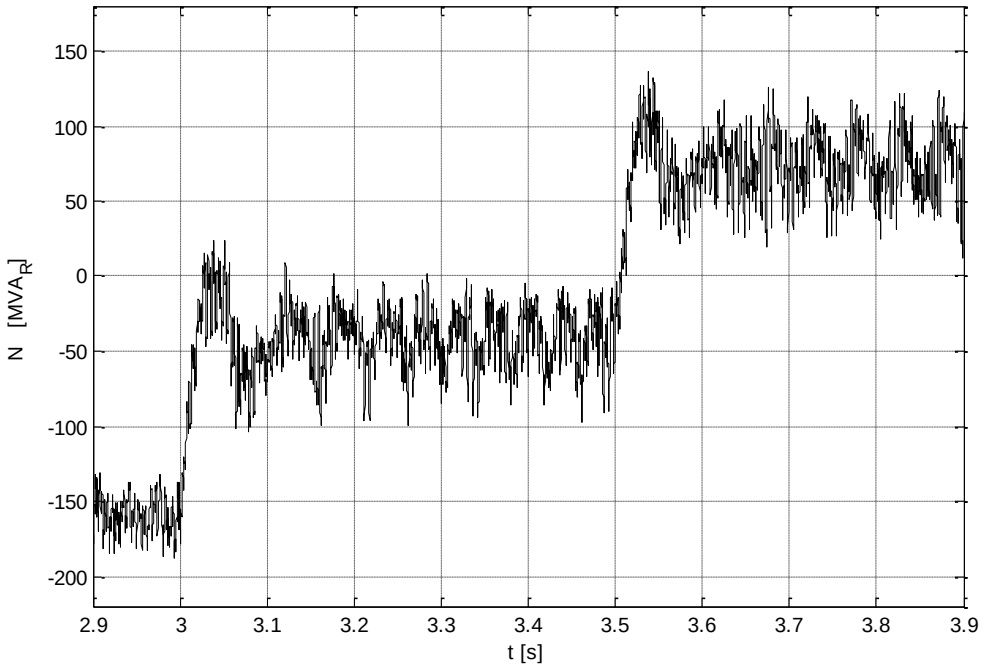

Figura 5.62: Potência reativa filtrada no terminal retificador com SVC.

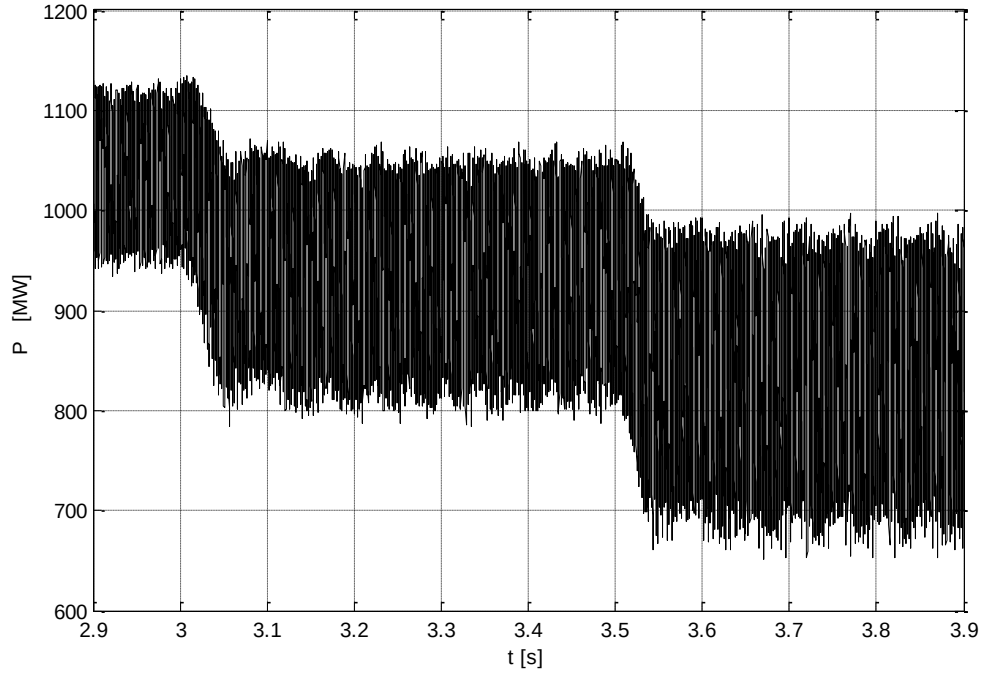

Figura 5.63: Potência ativa não filtrada no terminal retificador com SVC.

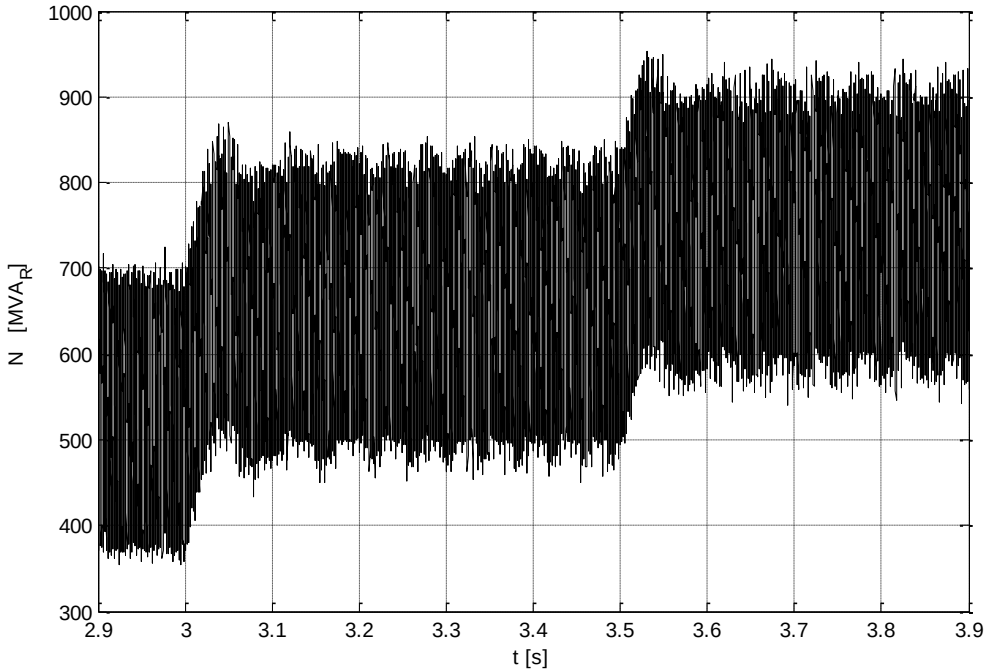

Figura 5.64: Potência reativa não filtrada no terminal retificador com SVC.

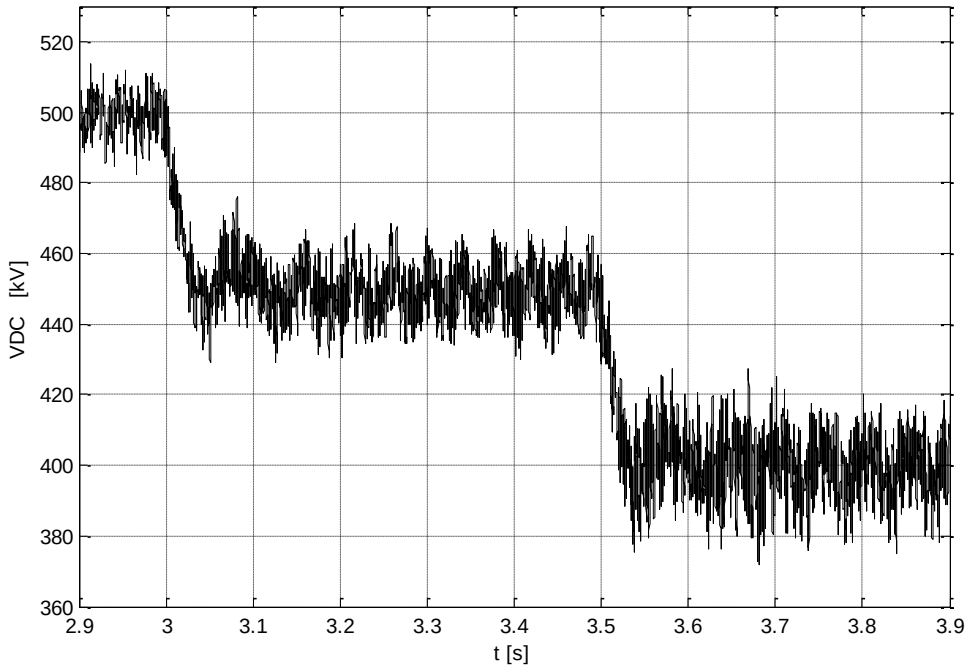

Figura 5.65: Tensão DC no terminal inversor com SVC.

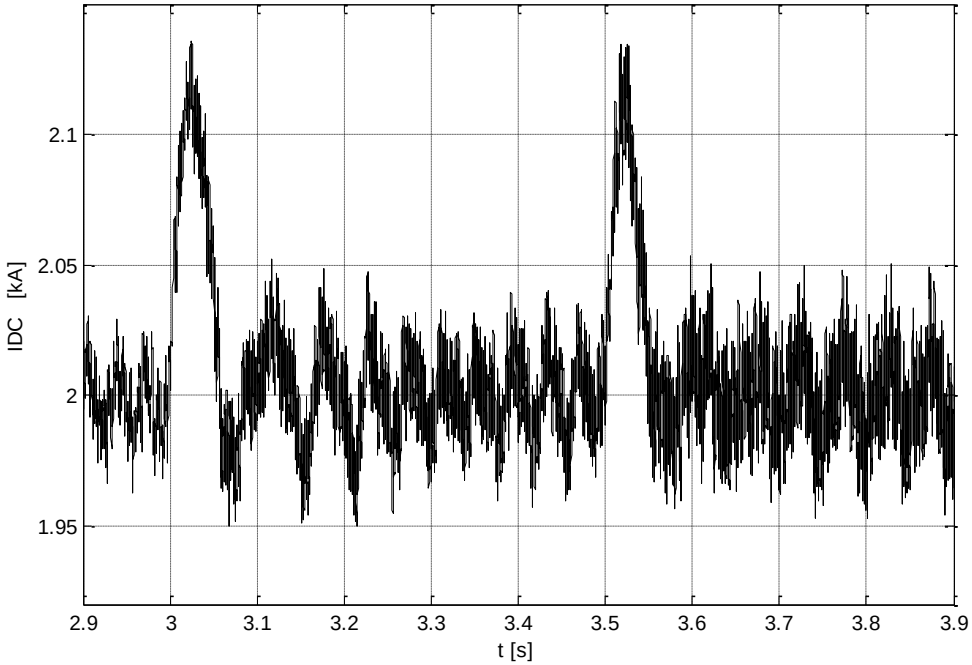

Figura 5.66: Corrente DC no terminal inversor com SVC.

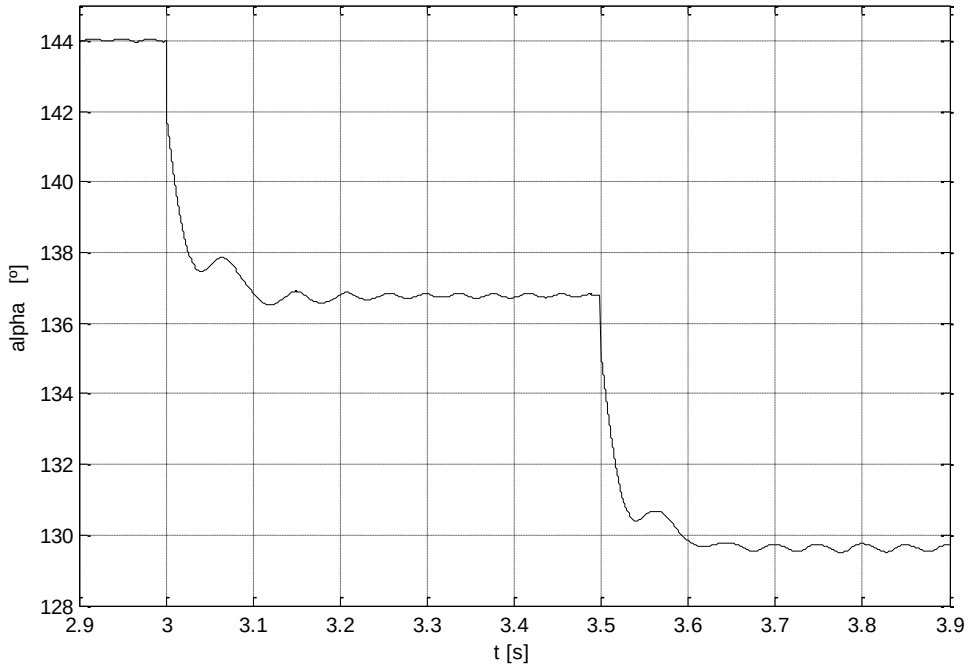

Figura 5.67: Ângulo de disparo no inversor com SVC.

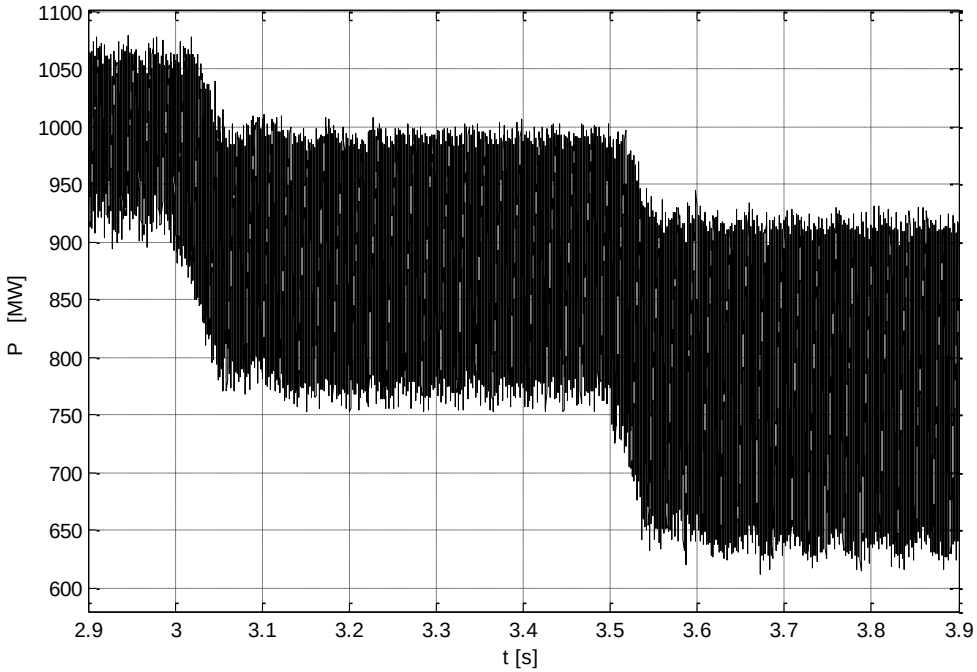

Figura 5.68: Potência ativa não filtrada no terminal inversor com SVC.

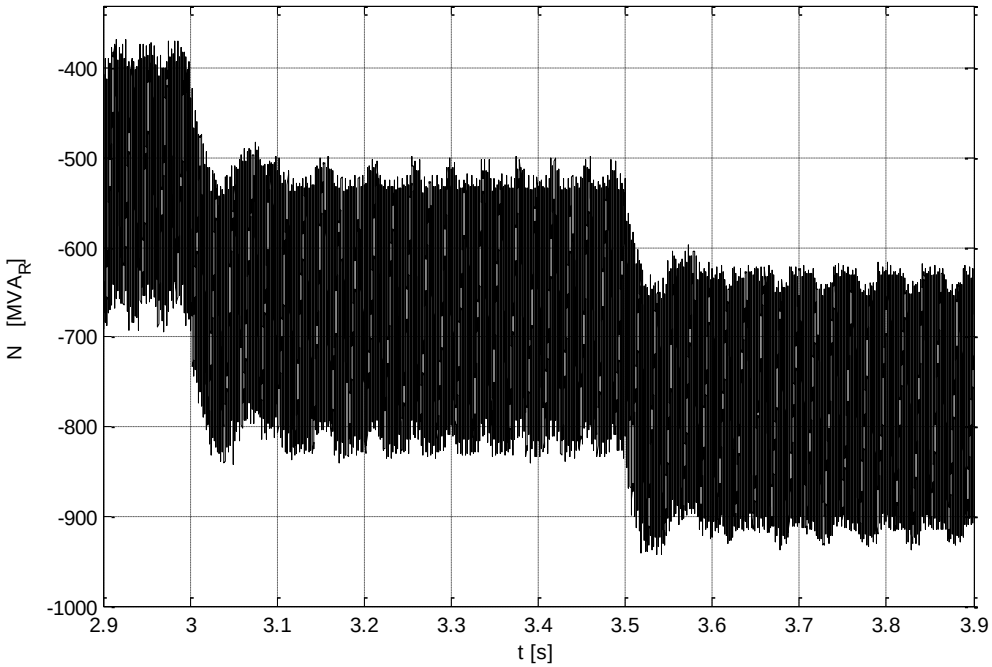

Figura 5.69: Potência reativa não filtrada no terminal inversor com SVC.

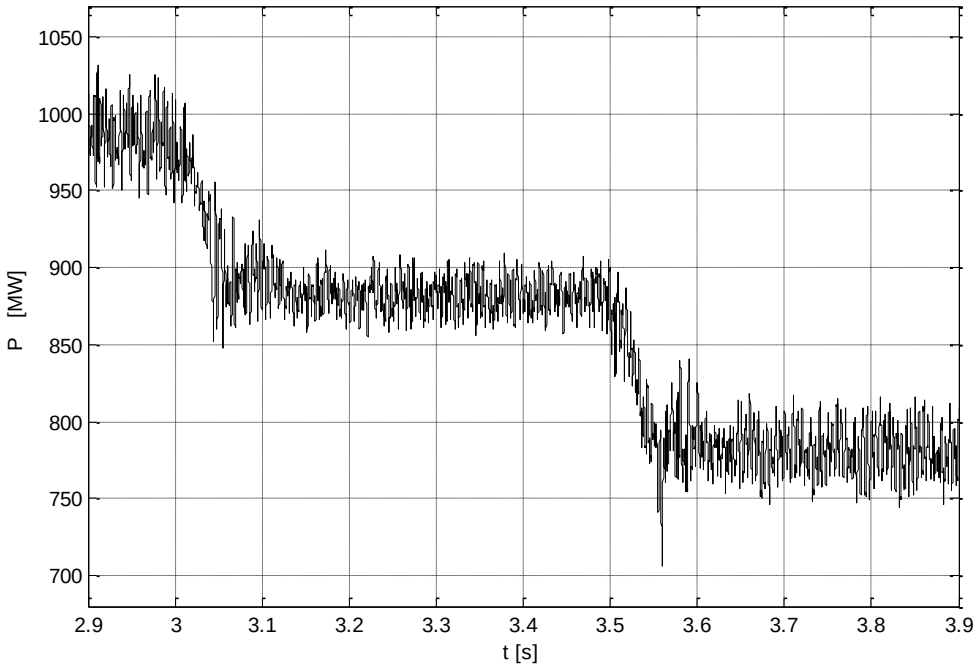

Figura 5.70: Potência ativa filtrada no terminal inversor com SVC.

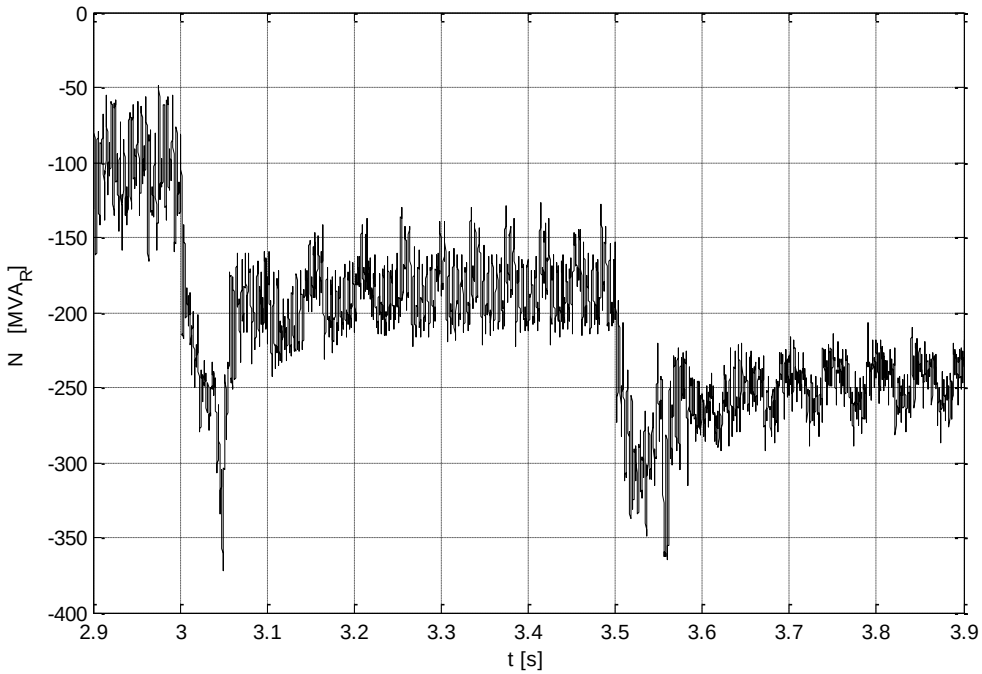

Figura 5.71: Potência reativa filtrada no terminal inversor com SVC.

Nas tabelas 5.5 e 5.6 são mostrados os valores do modelo do MATLAB e calculado, segundo o modelo clássico, de tensão de linha, corrente de linha, potência aparente, potência ativa, potência não-ativa, ângulo de carga, ângulo de disparo, corrente DC e tensão DC. Nota-se que o modelo clássico fornece resultados satisfatórios

para o cálculo dos valores do modelo do MATLAB após o filtro. Algumas das grandezas medidas apresentam altos níveis de ruído.

Tabela 5.5: Grandezas medidas (simuladas pelo MATLAB) e calculadas (modelo clássico) para o terminal retificador com SVC, operação nominal, com SVC, @ 2s, @ 3.4s, @ 3.8s e 60Hz.

	V NOMINAL		90% V NOMINAL		80% V NOMINAL	
	MATLAB	Clássico	MATLAB	Clássico	MATLAB	Clássico
$V_L \quad [kV]$	485.9	485.9	476.9	476.9	469.8	469.8
$I_L \quad [kA]$	1.386	1.386	1.390	1.390	1.395	1.395
$S_{3\phi} \quad [MVA]$	1166.0	1166.0	1148.1	1148.1	1135.0	1135.0
$P_{3\phi} \quad [MW]$	1029.9	1047.6	925.5	953.6	838.7	863.5
$N_{3\phi} \quad [MVA_R]$	546.6	512.0	679.4	639.5	764.8	736.6
$\phi \quad [^o]$	28.04	26.05	36.11	33.85	41.49	40.47
$\alpha_R \quad [^o]$	19.98	19.98	29.21	29.21	36.50	36.50
$I_{DC} \quad [kA]$	1.998	1.999	2.000	2.005	1.997	2.012
$V_{DC} \quad [kV]$	509.5	524.0	456.5	475.5	412.4	429.1

Tabela 5.6: Grandezas medidas (simuladas pelo MATLAB) e calculadas (modelo clássico)npara o terminal inversor com SVC , operação nominal, com SVC, @ 2s, @3.4s, @ 3.8s e 50Hz.

	V NOMINAL		90% V NOMINAL		80% V NOMINAL	
	MATLAB	Clássico	MATLAB	Clássico	MATLAB	Clássico
$V_L \quad [kV]$	346.3	346.3	343.1	343.1	340.8	340.8
$I_L \quad [kA]$	1.879	1.879	1.882	1.882	1.883	1.883
$S_{3\phi} \quad [MVA]$	1127.0	1127.0	1118.4	1118.4	1111.5	1111.5
$P_{3\phi} \quad [MW]$	987.1	1000.8	883.4	904.2	788.6	798.9
$N_{3\phi} \quad [MVA_R]$	544.0	518.2	685.8	658.1	783.3	772.8
$\phi \quad [^o]$	-28.05	27.37	-37.03	36.05	-44.25	44.05
$\alpha_I \quad [^o]$	144.03	144.03	136.80	136.80	129.69	129.69
$I_{DC} \quad [kA]$	1.995	1.995	1.995	1.999	1.998	2.000
$V_{DC} \quad [kV]$	501.0	501.6	449.0	452.4	402.9	399.5

5.6 Simulação com valores distintos de corrente DC com SVC

As figuras 5.72 a 5.85 mostram as duas condições de operação simuladas, para níveis distintos de corrente DC, com SVC. A potência ativa e reativa sofre uma redução, mas nesse caso não há uma “sobra” crescente de potência reativa do conjunto SVC e filtro, permanecendo o sistema conversores/SVC apenas ligeiramente capacitivo.

Nas tabelas 5.7 e 5.8 são mostrados os valores do modelo do MATLAB e do modelo clássico, da tensão de linha, corrente de linha, potência aparente, potência ativa, potência não-ativa, ângulo de carga, ângulo de disparo, corrente DC e tensão DC. Nesse caso, o modelo clássico também fornece resultados satisfatórios para o cálculo dos valores do modelo do MATLAB antes do filtro.

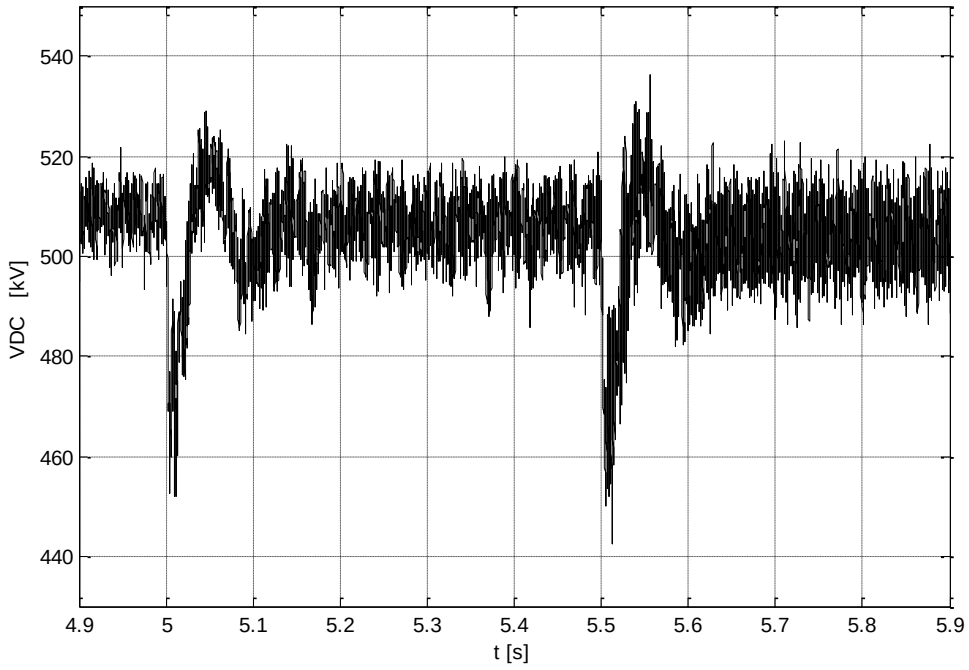

Figura 5.72: Tensão DC no terminal retificador com SVC.

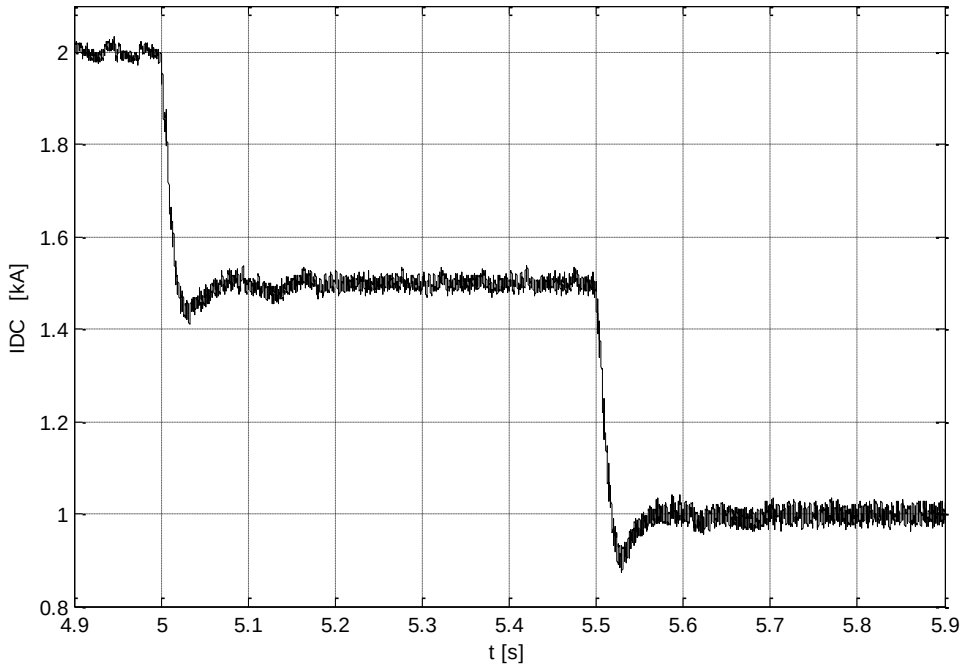

Figura 5.73: Corrente DC no terminal retificador com SVC.

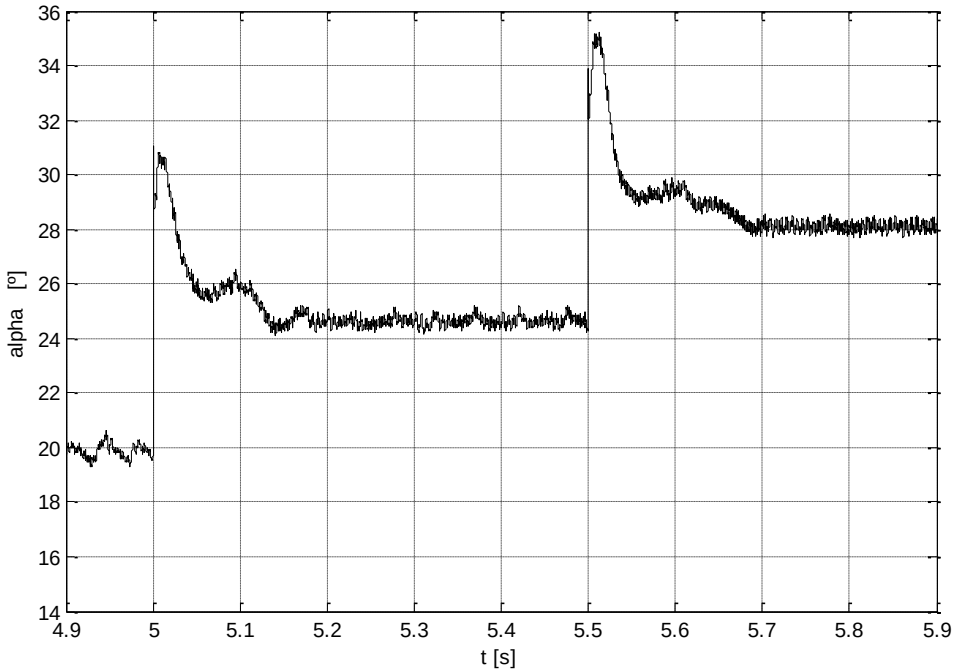

Figura 5.74: Ângulo de disparo no retificador com SVC.

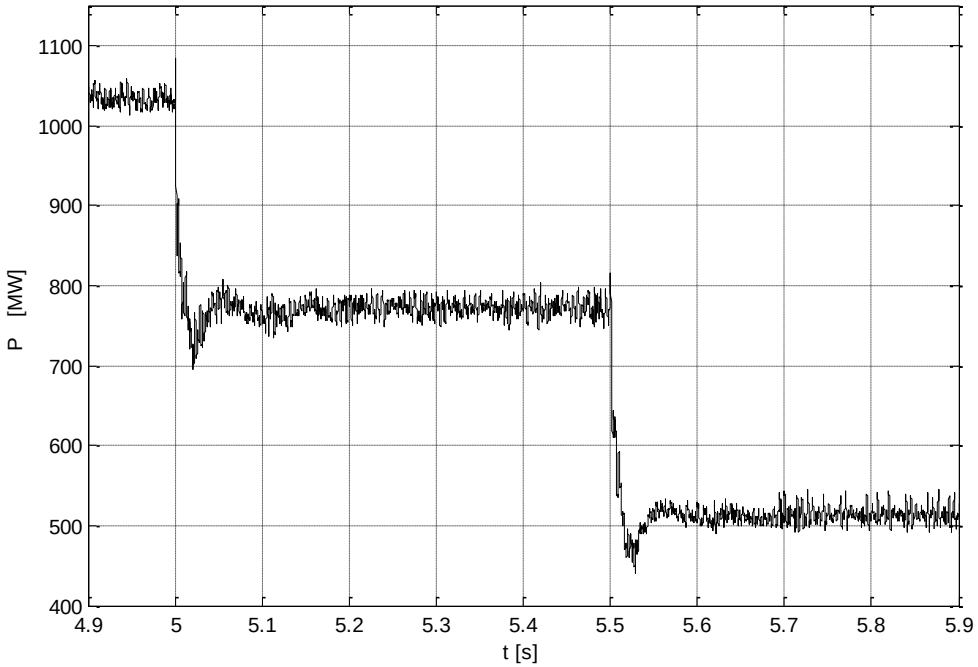

Figura 5.75: Potência ativa filtrada no terminal retificador com SVC.

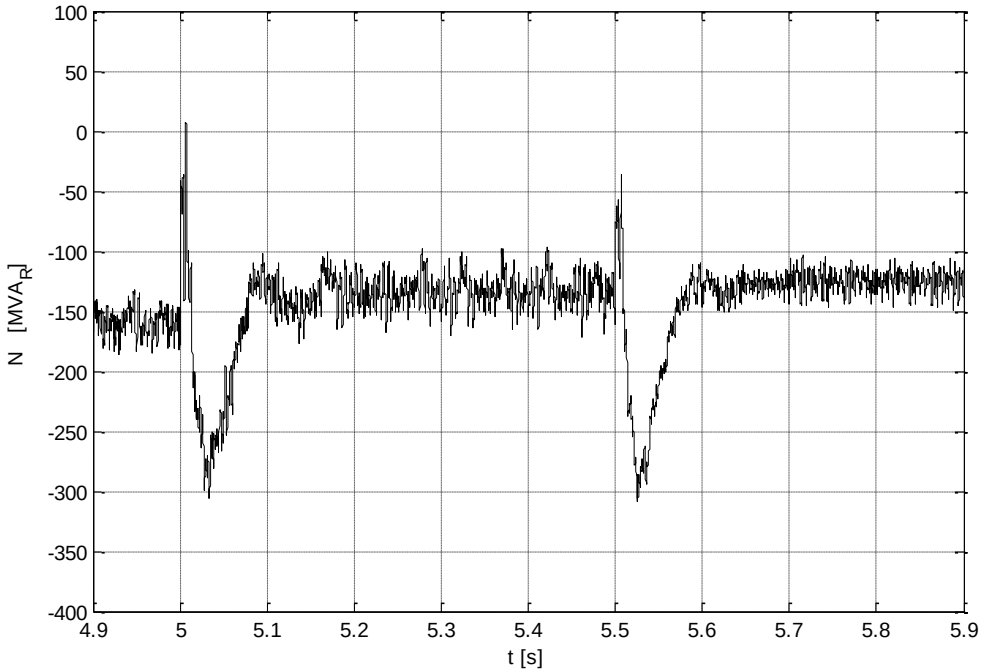

Figura 5.76: Potência reativa filtrada no terminal retificador com SVC.

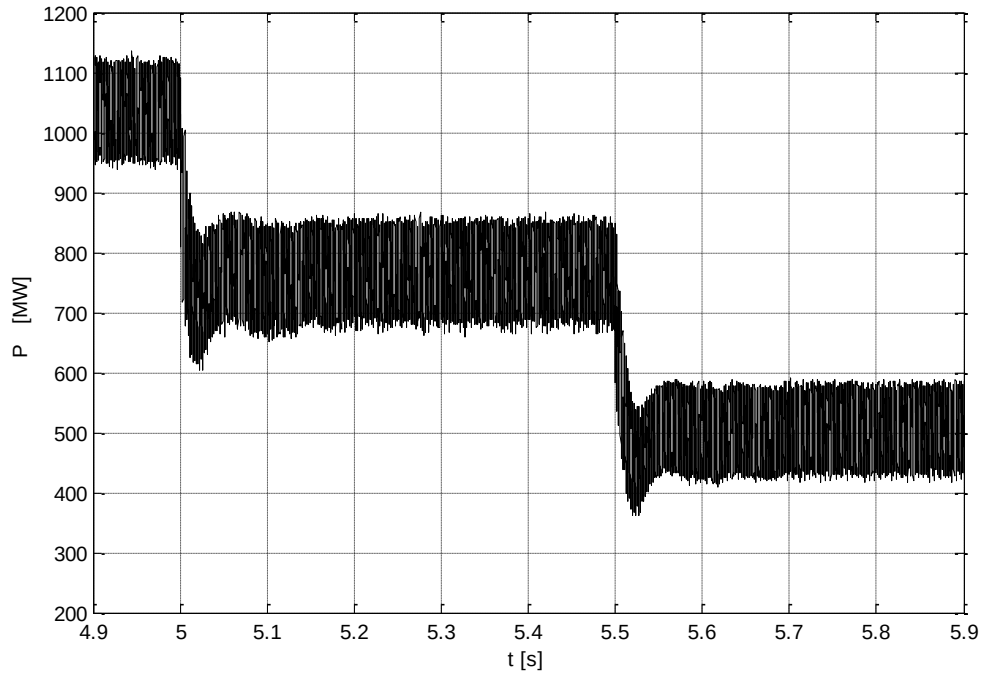

Figura 5.77: Potência ativa não filtrada no terminal retificador com SVC.

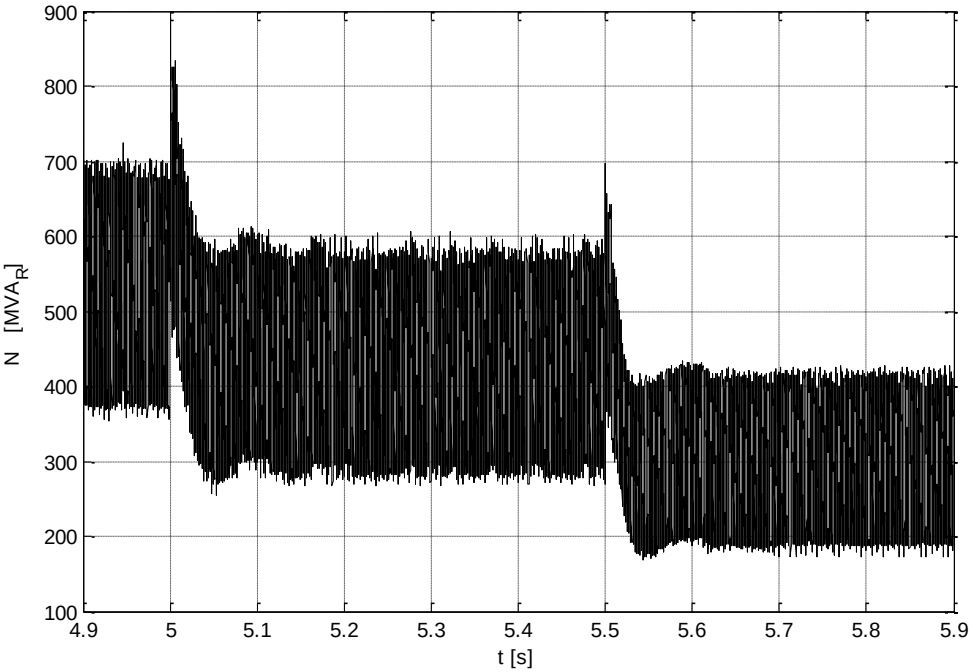

Figura 5.78: Potência reativa não filtrada no terminal retificador com SVC.

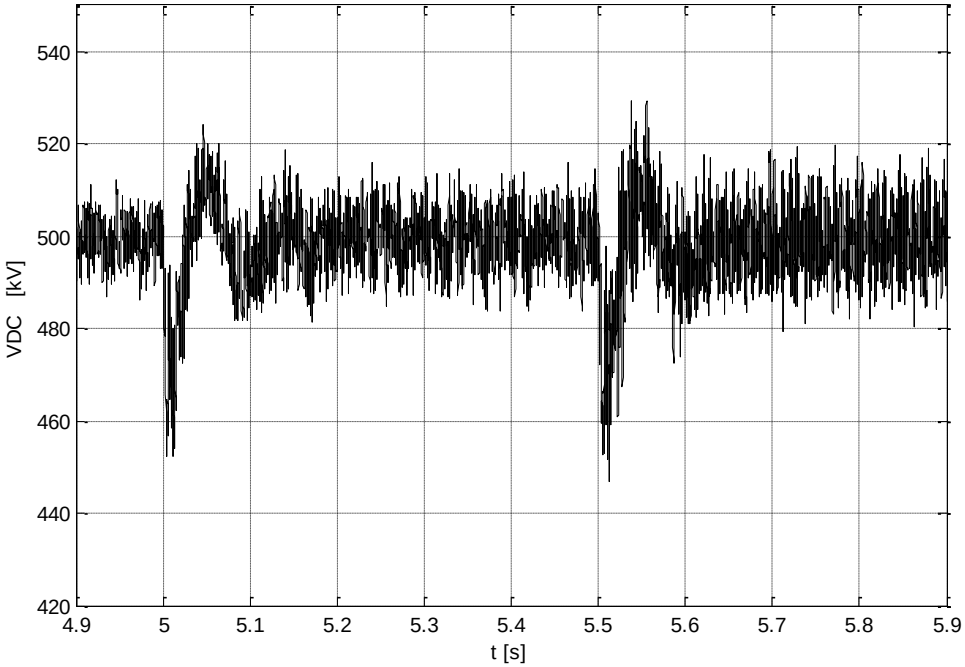

Figura 5.79: Tensão DC no terminal inversor com SVC.

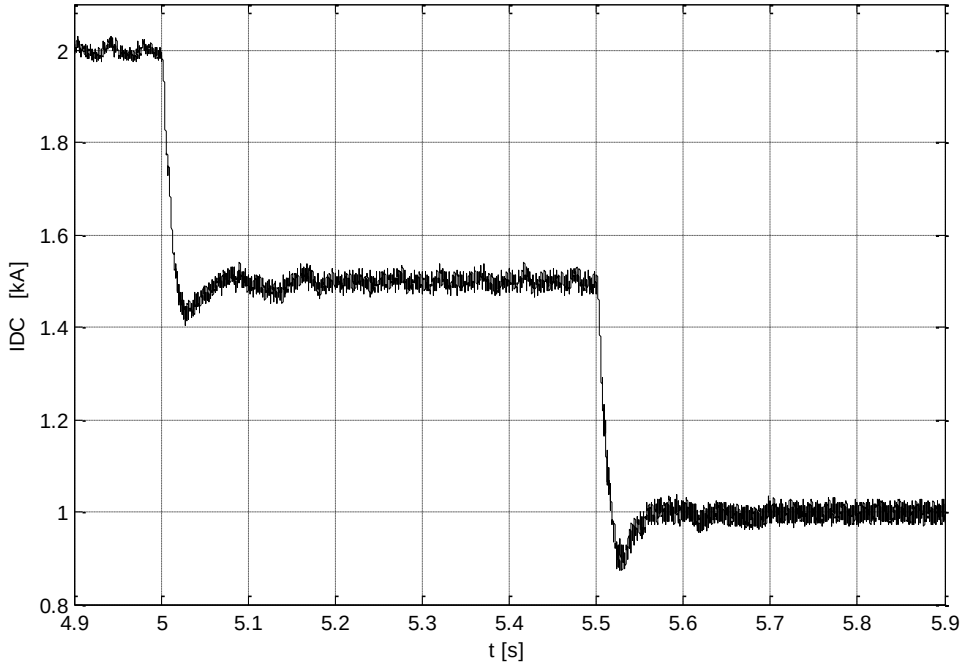

Figura 5.80: Corrente DC no terminal inversor com SVC.

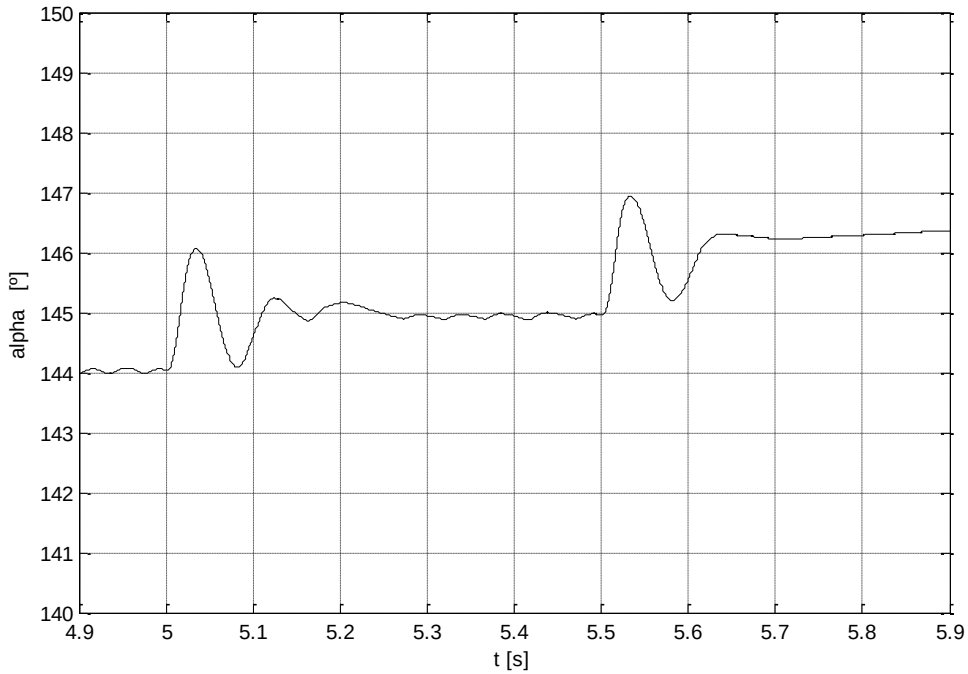

Figura 5.81: Ângulo de disparo no inversor com SVC.

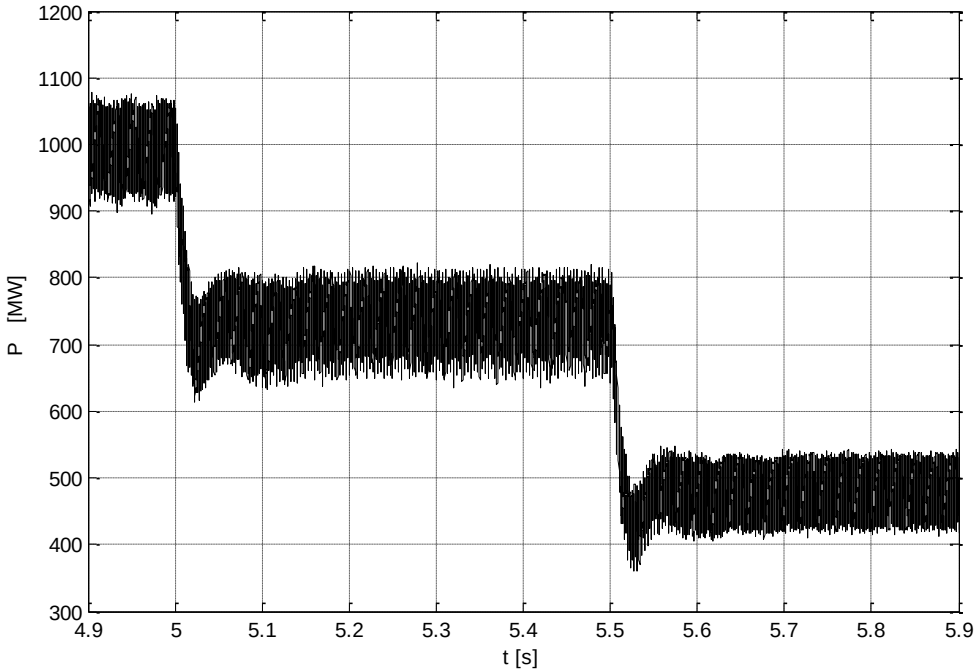

Figura 5.82: Potência ativa não filtrada no terminal inversor com SVC.

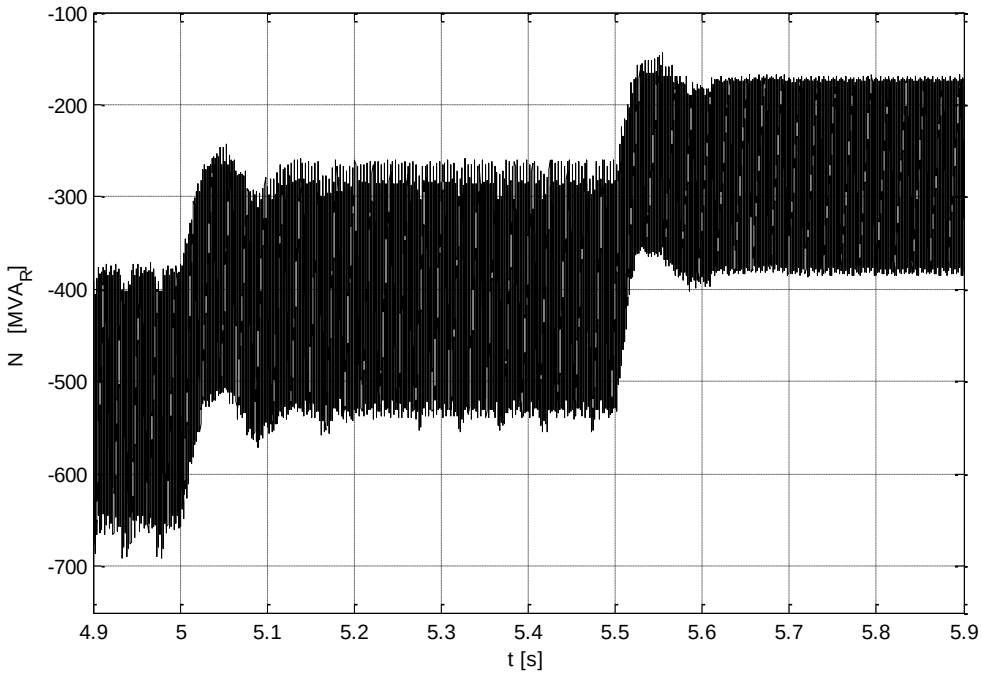

Figura 5.83: Potência reativa não filtrada no terminal inversor com SVC.

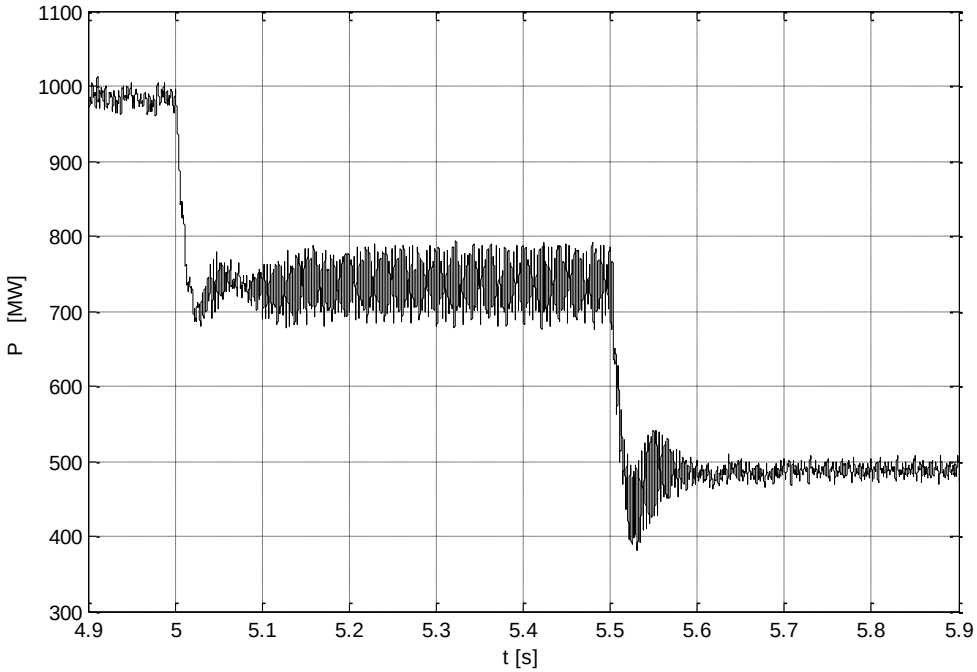

Figura 5.84: Potência ativa filtrada no terminal inversor com SVC.

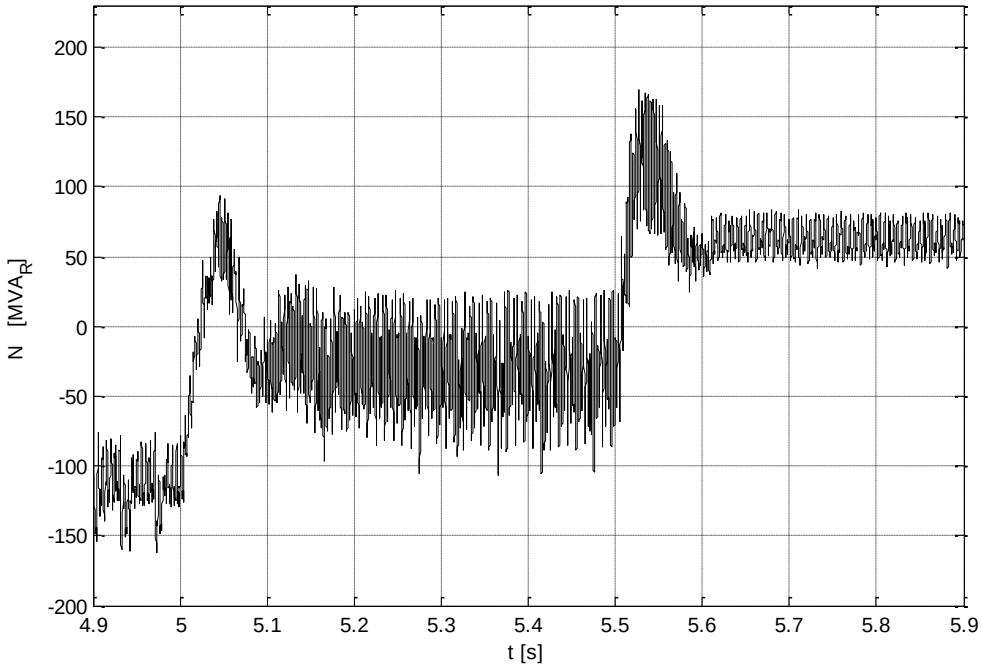

Figura 5.85: Potência reativa filtrada no terminal inversor com SVC.

Tabela 5.7: Grandezas medidas (simuladas pelo MATLAB) e calculadas (modelo clássico) para o terminal retificador com SVC, corrente reduzida, com SVC, @ 5.4s, @ 5.8s e 60Hz.

	75% I NOMINAL		50% I NOMINAL	
	MATLAB	Clássico	MATLAB	Clássico
$V_L \quad [kV]$	493.6	493.6	500.8	500.8
$I_L \quad [kA]$	1.046	1.046	0.699	0.699
$S_{3\phi} \quad [MVA]$	893.8	893.8	606.5	606.5
$P_{3\phi} \quad [MW]$	771.6	785.4	513.6	522.9
$N_{3\phi} \quad [MVA_R]$	451.3	426.8	322.6	307.4
$\phi \quad [^o]$	29.75	28.52	31.49	30.45
$\alpha_R \quad [^o]$	24.58	24.58	28.08	28.08
$I_{DC} \quad [kA]$	1.500	1.509	1.001	1.009
$V_{DC} \quad [kV]$	507.0	520.6	504.0	518.2

Tabela 5.8: Grandezas medidas (simuladas pelo MATLAB) e calculadas (modelo clçássico) para o terminal inversor com SVC, corrente reduzida, com SVC, @ 5.4s, @ 5.8s e 50Hz.

	75% I NOMINAL		50% I NOMINAL	
	MATLAB	Clássico	MATLAB	Clássico
$V_L \quad [kV]$	347.4	347.4	349.6	349.6
$I_L \quad [kA]$	1.411	1.411	0.941	0.941
$S_{3\phi} \quad [MVA]$	848.9	848.9	569.5	569.5
$P_{3\phi} \quad [MW]$	739.8	744.6	492.1	496.0
$N_{3\phi} \quad [MVA_R]$	416.3	407.7	286.7	279.9
$\phi \quad [^o]$	-29.02	28.70	-29.37	29.43
$\alpha_I \quad [^o]$	144.90	144.90	146.29	146.29
$I_{DC} \quad [kA]$	1.503	1.498	1.000	0.999
$V_{DC} \quad [kV]$	498.7	497.0	499.3	496.6

5.7 Simulação de uma falta AC na rede 50Hz com SVC

Um curto-circuito trifásico na rede 50Hz é aplicado e a resistência de falta foi arbitrada para 2Ω. A falta ocorre entre os instantes 7s e 8.5s. As figuras 5.86 a 5.89 mostram as tensões de fase e correntes de fase. As figuras 5.90 a 5.103 são análogas às das seções anteriores. Para esse caso, a redução no nível da tensão AC na rede de 50Hz impede que o inversor opere com a tensão no link DC no valor nominal, isso afeta o controle no retificador, a corrente no link DC, a potência DC e o suporte de reativos do SVC e filtro.

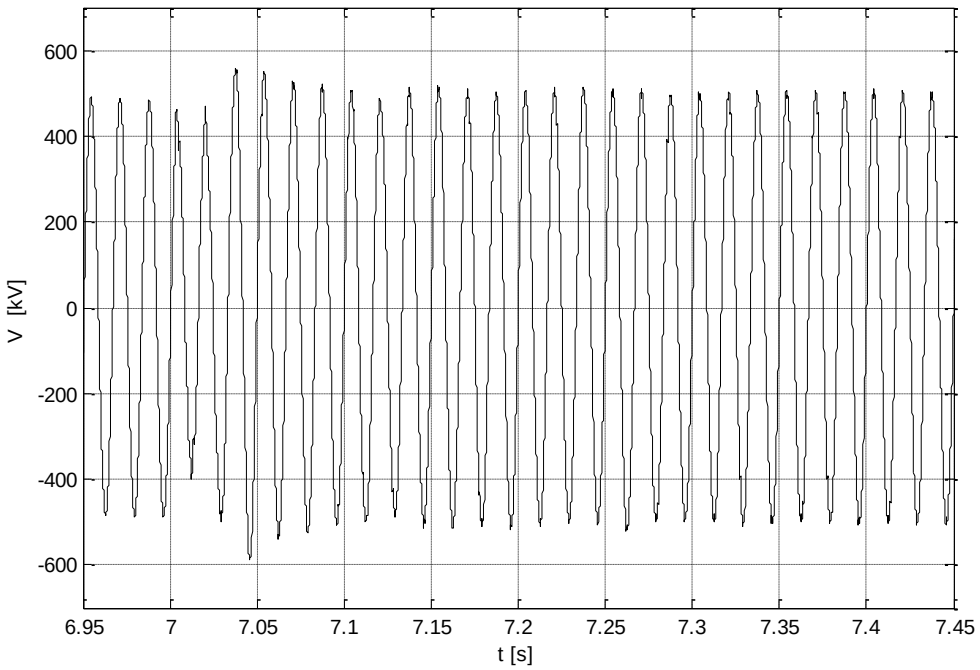

Figura 5.86: Tensão AC na rede de 60Hz com SVC.

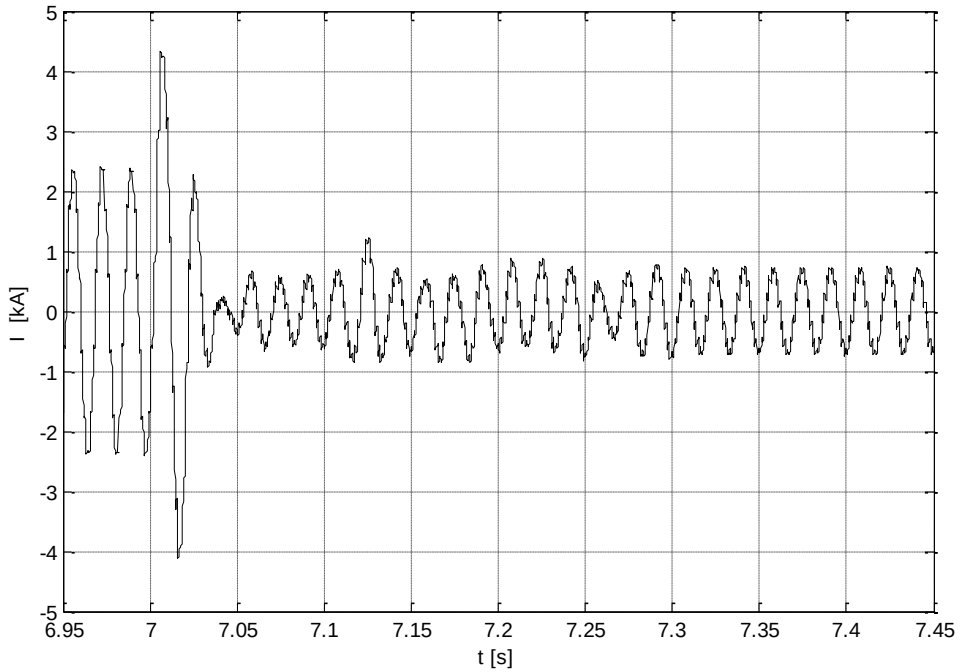

Figura 5.87: Corrente AC na rede de 60Hz com SVC.

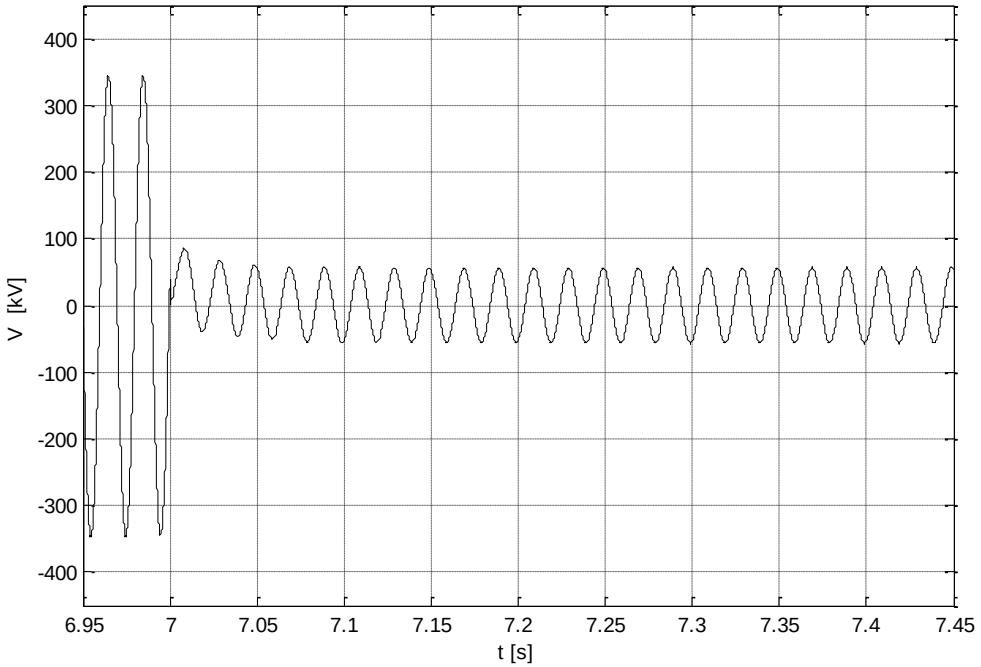

Figura 5.88: Tensão AC na rede de 50Hz com SVC.

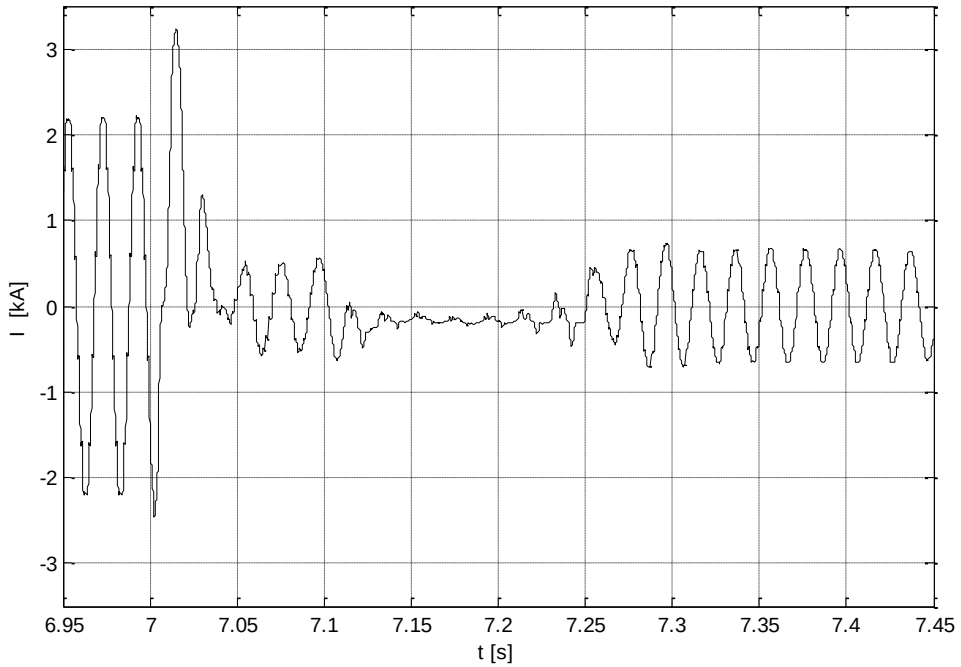

Figura 5.89: Corrente AC na rede de 50Hz com SVC.

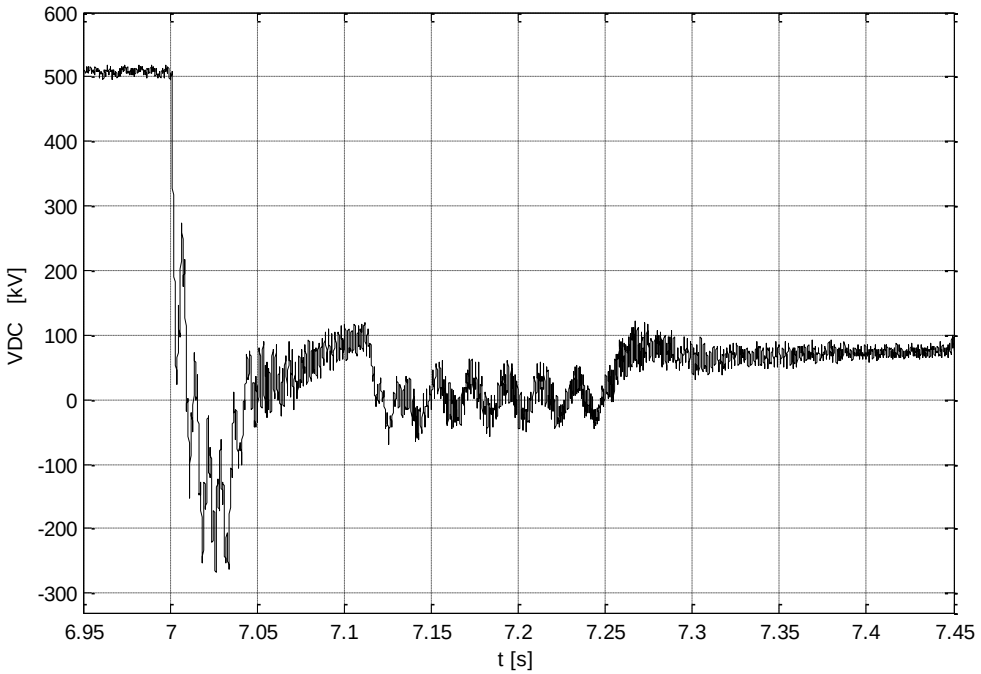

Figura 5.90: Tensão DC no terminal retificador com SVC.

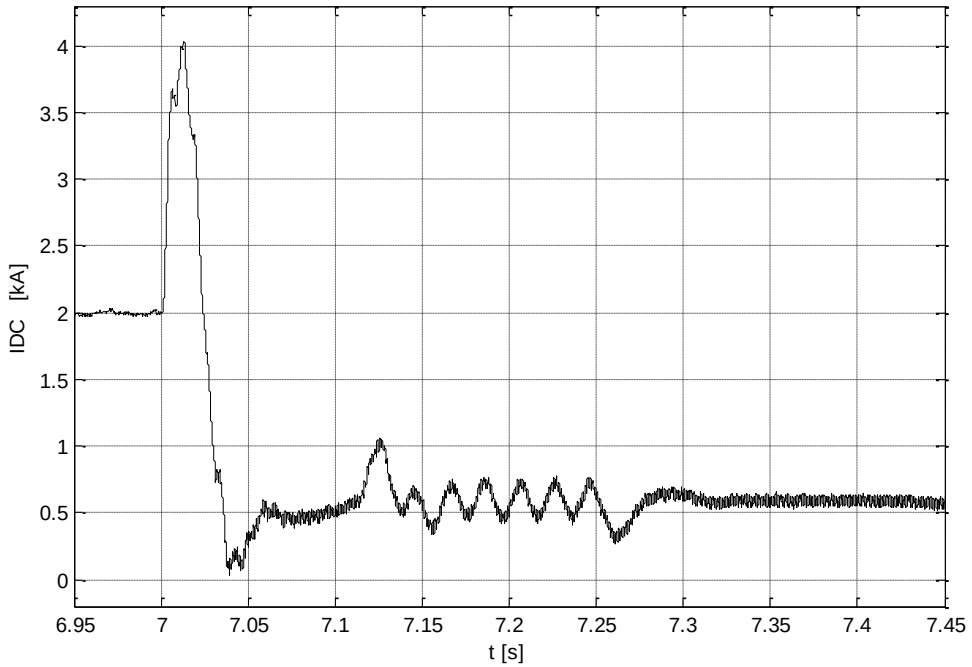

Figura 5.91: Corrente DC no terminal retificador com SVC.

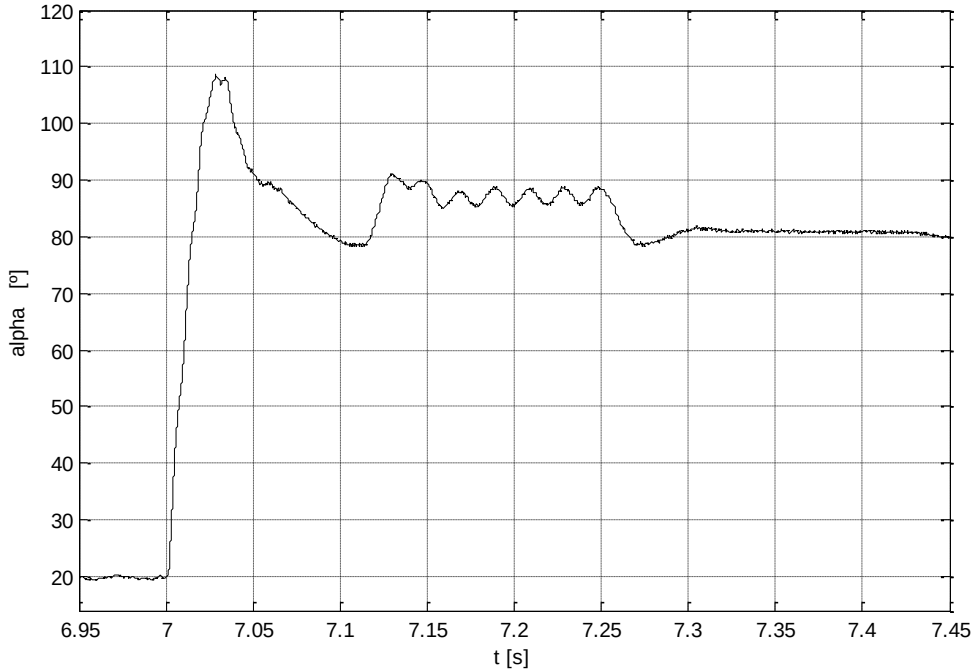

Figura 5.92: Ângulo de disparo no retificador com SVC.

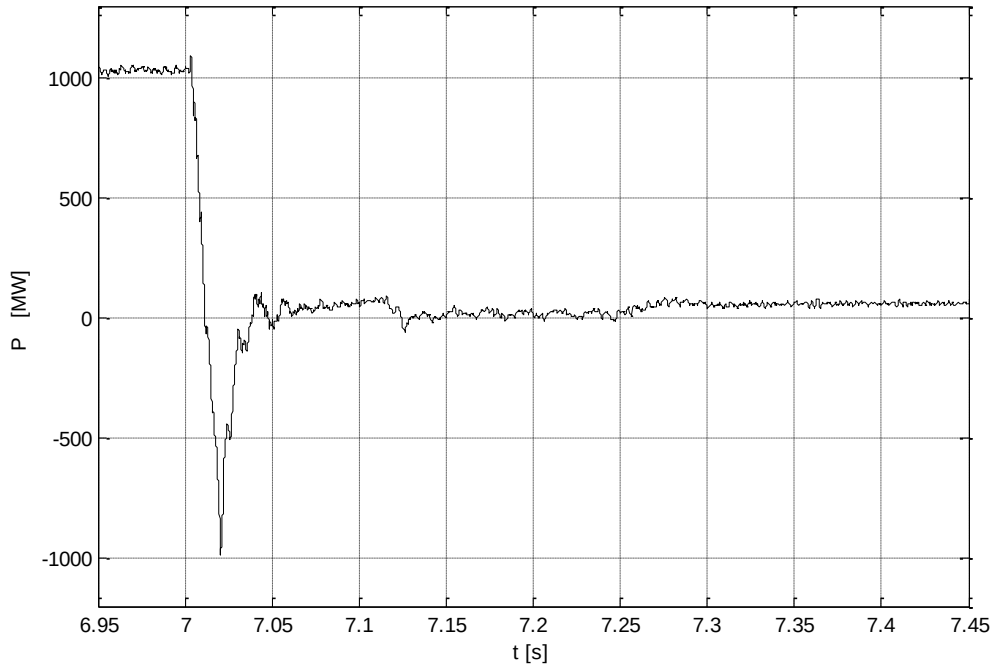

Figura 5.93: Potência ativa filtrada no terminal retificador com SVC.

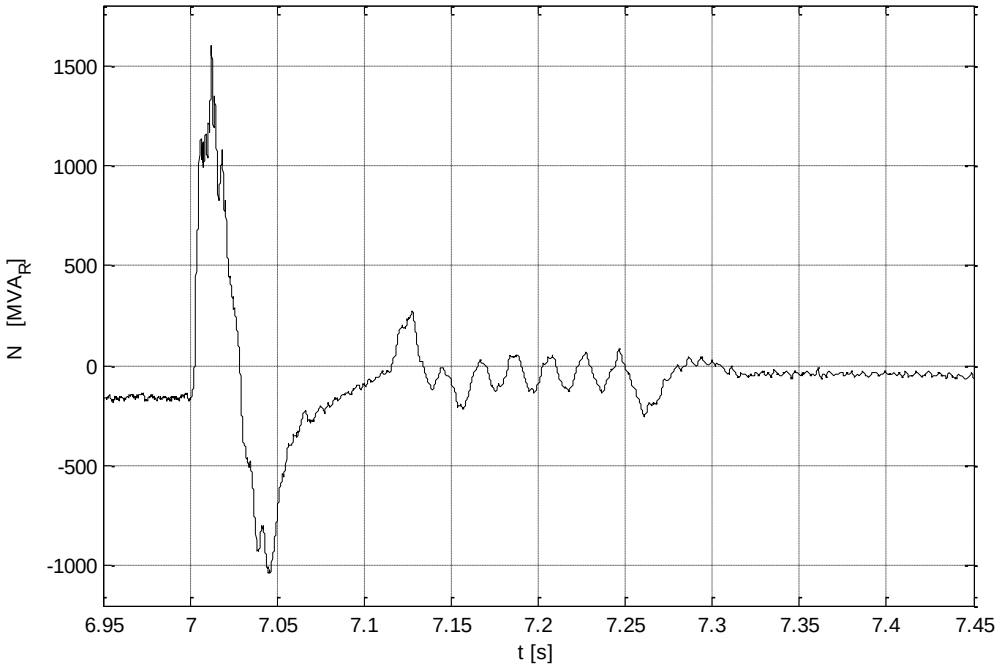

Figura 5.94: Potência reativa filtrada no terminal retificador com SVC.

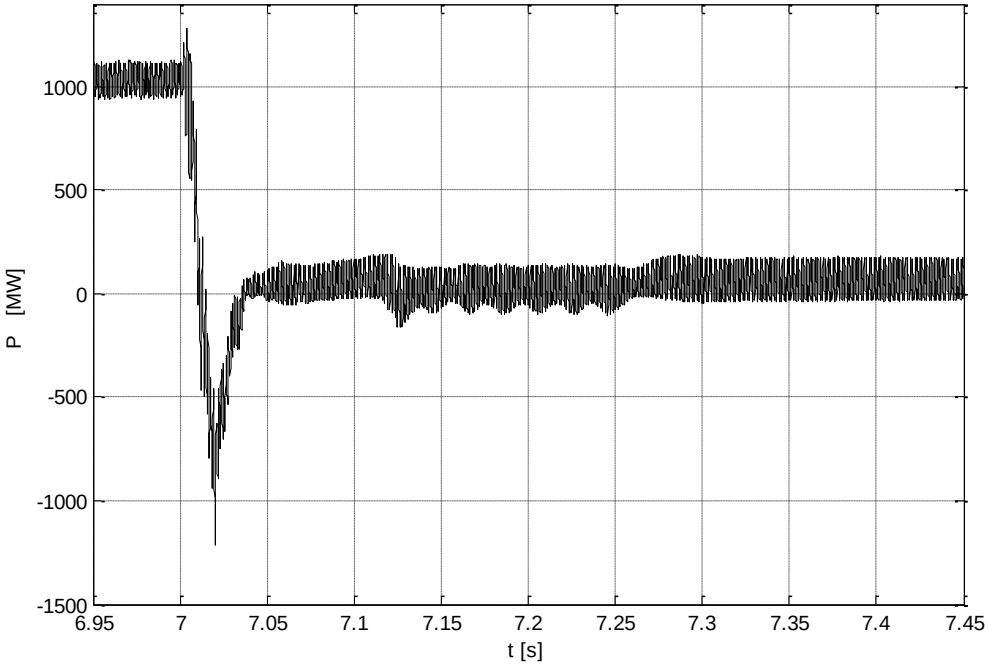

Figura 5.95: Potência ativa não filtrada no terminal retificador com SVC.

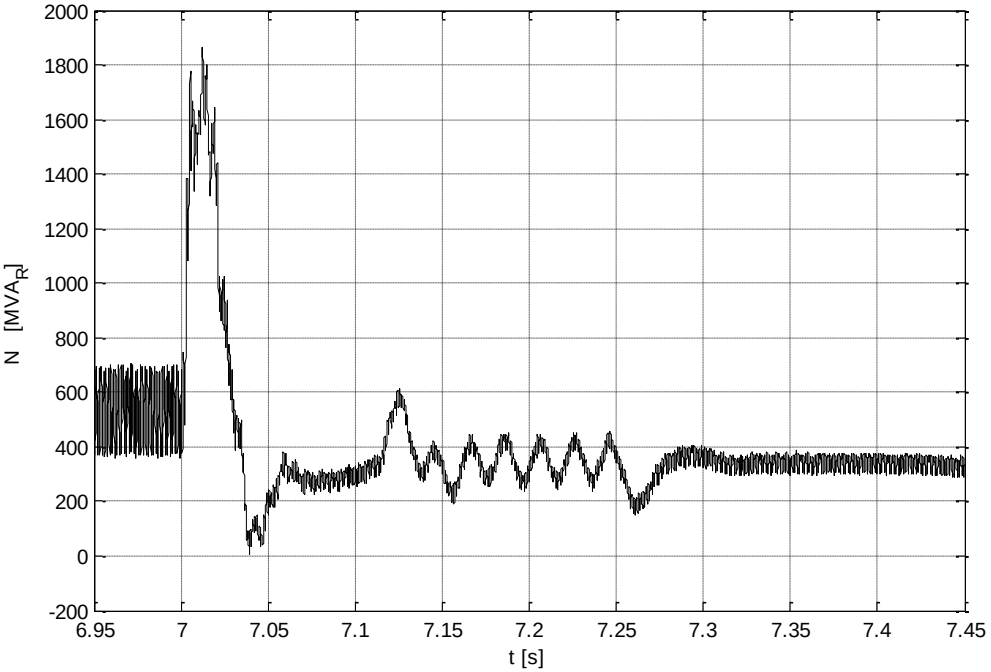

Figura 5.96: Potência reativa não filtrada no terminal retificador com SVC.

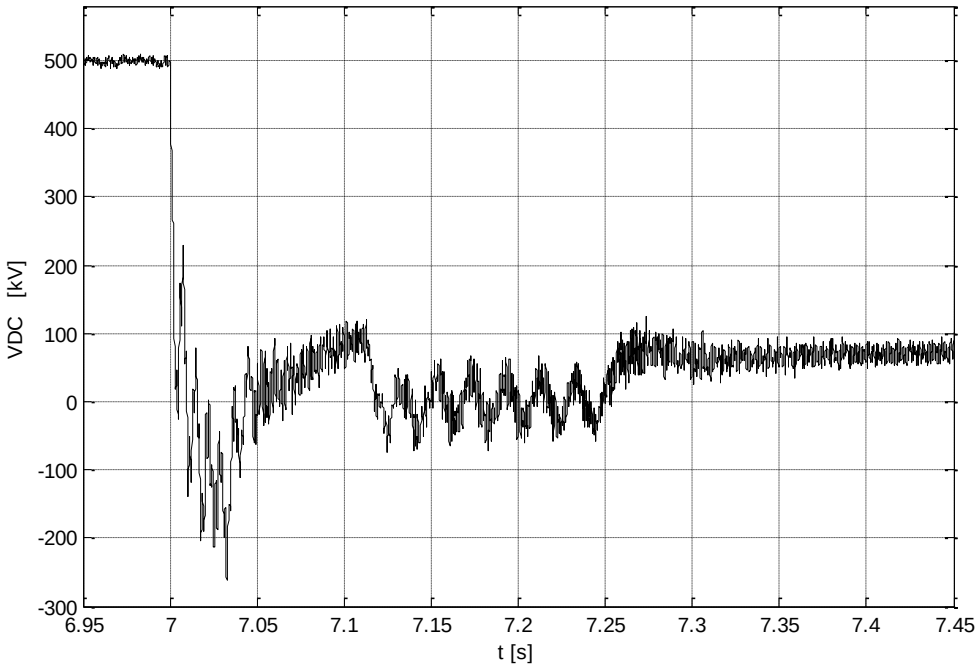

Figura 5.97: Tensão DC no terminal inversor com SVC.

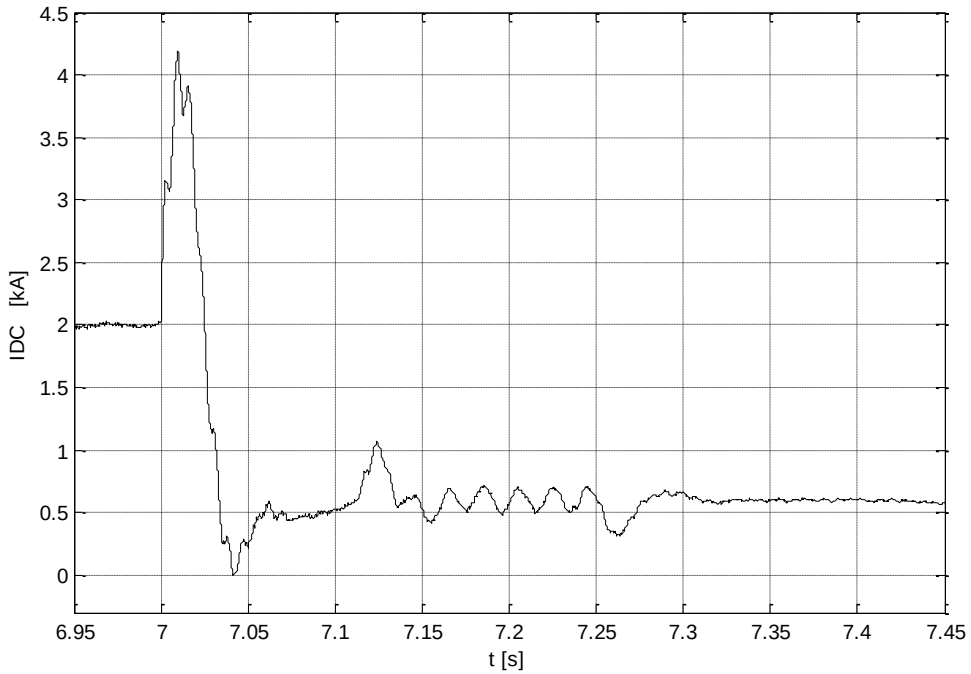

Figura 5.98: Corrente DC no terminal inversor com SVC.

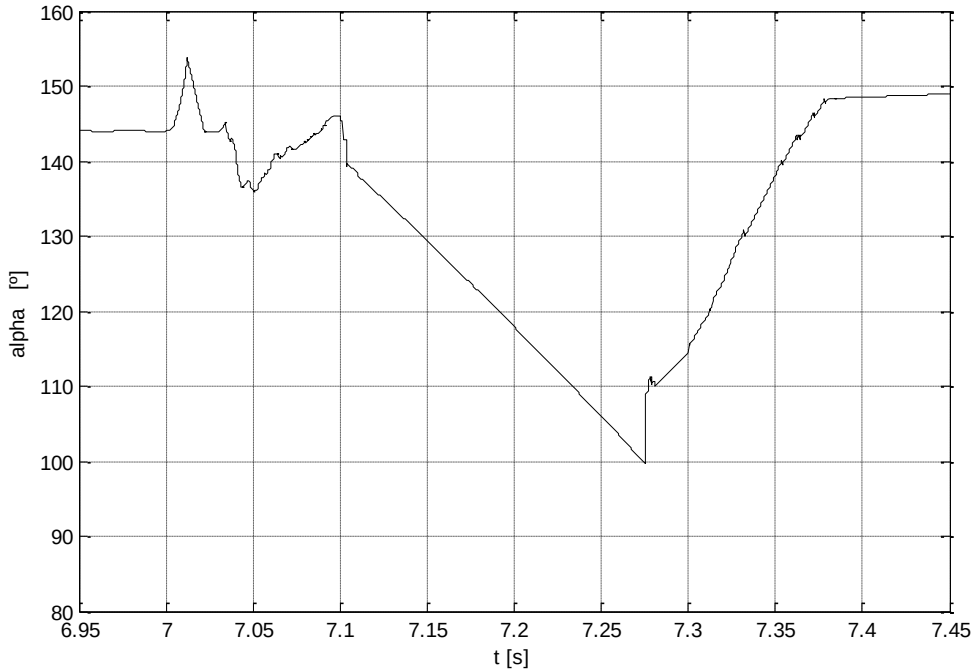

Figura 5.99: Ângulo de disparo no inversor com SVC.

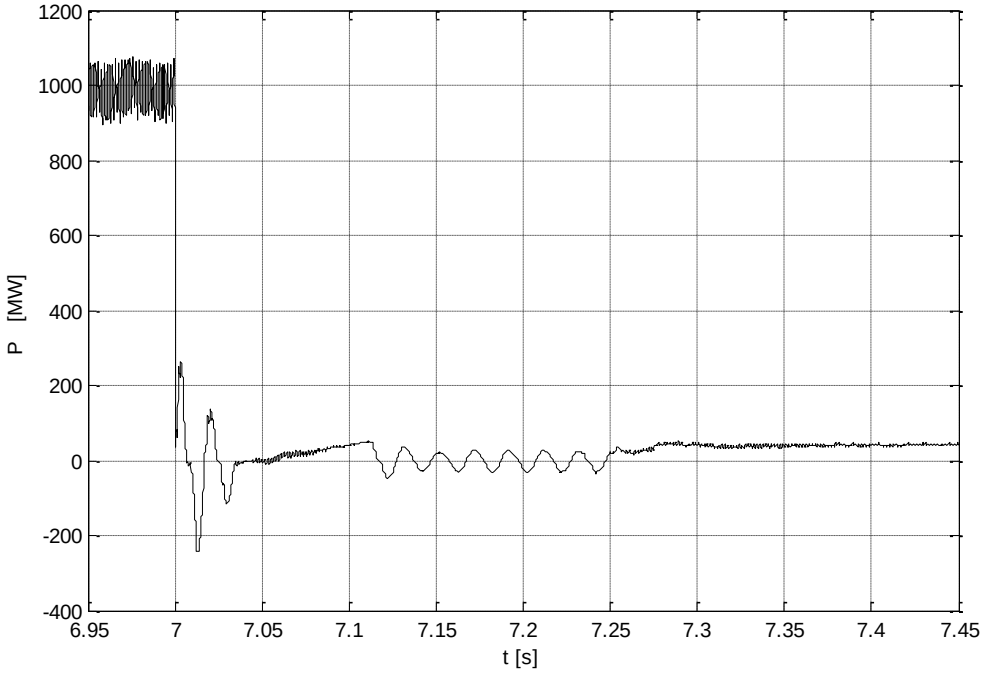

Figura 5.100: Potência ativa não filtrada no terminal inversor com SVC.

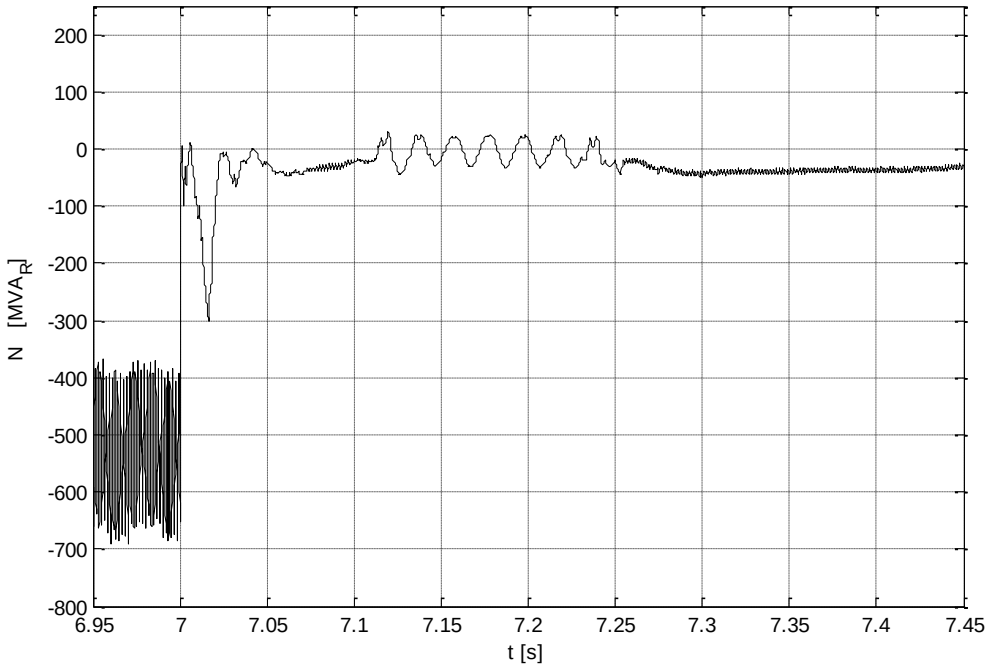

Figura 5.101: Potência reativa não filtrada no terminal inversor com SVC.

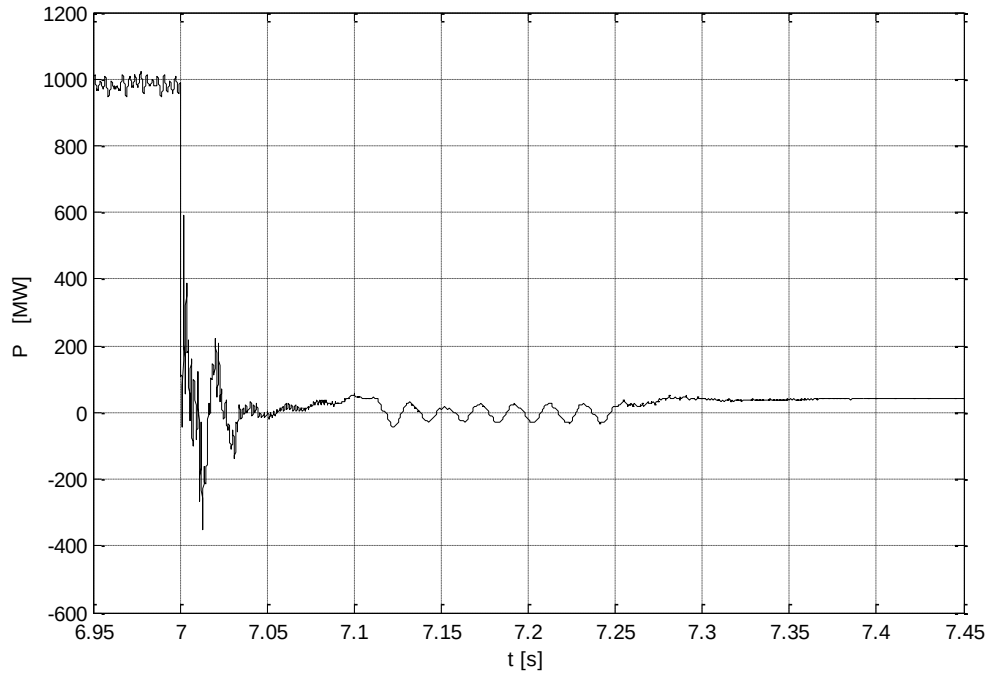

Figura 5.102: Potência ativa filtrada no terminal inversor com SVC.

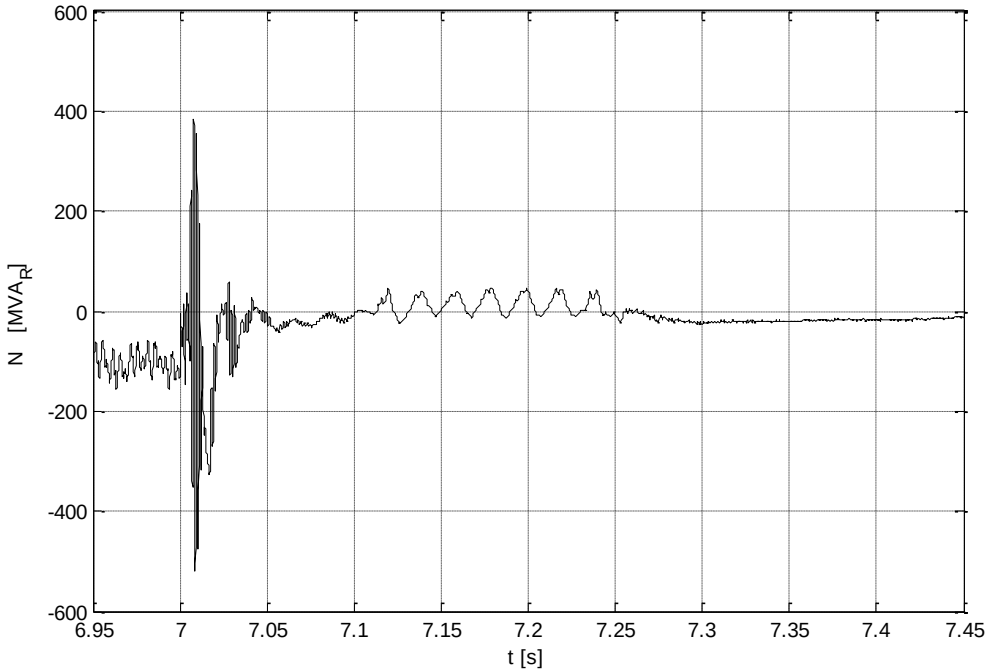

Figura 5.103: Potência reativa filtrada no terminal inversor com SVC.

Comparando o caso de falta AC para o SVC em relação ao uso do banco de capacitores, falta AC, nota-se que os resultados para tensão, corrente e potência são os mesmos. Isso indica que o SVC teve o mesmo efeito do banco de capacitores.

CAPÍTULO 6

Conclusão e Desenvolvimentos Futuros

As simulações mostram que o controle de corrente não necessita de grandes variações no ângulo de disparo dos conversores. Isso se deve à baixa resistência no *link* DC, de modo que uma diferença de potencial relativamente pequena é suficiente para estabelecer a corrente nominal. Isto implica em aumentos discretos da demanda por reativos dos conversores, quando operam com corrente reduzida. Na operação com tensão reduzida ocorre o contrário, de modo que os conversores aumentam bastante sua demanda por reativos. Esse comportamento pode ser particularmente ruim quando envolver a operação do sistema em condições de alta solicitação de reativos e tensões reduzidas, como nos problemas de colapso de tensão. Além disso, no período transitório que se segue a uma falta, pode haver inversão no sentido da potência ativa nos conversores. Para problemas de estabilidade transitória, em que o objetivo é manter o sincronismo entre os geradores, esse comportamento do *link* DC pode se tornar um complicador.

A substituição do banco de capacitores pelo SVC não alterou significativamente o comportamento dos parâmetros do sistema como tensão e corrente. Porém, a demanda de reativos do sistema conversor/filtros/compensação mostrou um comportamento muito mais uniformizado. Isto era de se esperar, já que o SVC é um compensador controlado. Em regime permanente, o uso do SVC teve um efeito semelhante ao do filtro, diminuindo os harmônicos da tensão e corrente DC, nos terminais retificador e inversor. Entretanto, nos períodos transitórios, a acomodação mostrou-se mais lenta que no caso dos bancos de capacitores.

Os valores do modelo do MATLAB nos circuitos simulados e os valores calculados pelo modelo clássico, em geral, tiveram boa concordância, mostrando a validade do modelo clássico. Tais valores foram calculados apenas em regime permanente, mesmo no caso em falta, em que foi aguardado o fim do período transitório. Em estudos futuros será possível avaliar o comportamento desse modelo para cálculos efetuados durante os transitórios.

Outra sugestão de trabalhos futuros seria realizar simulações com *link* DC utilizando um conversor do tipo VSC-HVDC, que pode ser operado com diversas

filosofias de controle. Outro aspecto que merece investigação é a operação de links DC em redes com geração distribuída. Principalmente naquelas em que a geração de energia provém de fontes com um nível de intermitência significativo, como as eólicas.

REFERÊNCIAS

[1] FURFARI, F.A., *The Evolution of Power-Line Frequencies 133⅓ to 25Hz*, IEEE Industry Applications Magazine, v. 6, p. 12–14, sep/oct 2000.

[2] KIM, C. K.; SOOD, V. K.; JANG, G. S.; LIM, S. J.; LEE, S. J. *"HVDC TRANSMISSION: Power Conversion Applications in Power Systems".* 1 ed. Singapore, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2009. 352 p.

[3] BORRÉ, A. C. *"Bidirecionamento de Potência no Tap HVDC".* Dezembro, 2006. 117 f. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <www.pee.ufrj.br/teses/?Resumo=2006121801>. Acesso em 29 de mar. 2010.

[4] HAY, J. L.; HINGORANI, N. G. Dynamic Simulation of Multiconverter HVDC Systems by Digital Computer Part I: Mathematical Model. *IEEE Transactions on Power Apparatus and systems*, v. Pas-89, n. 2, p. 218-222, fev. 1970.

[5] ARRILLAGA, J.; BARROS, J. G. C.; AL – KHASHALI, H. J. Dynamic Modelling of Single Generators Connected to HVDC Convertors. *IEEE, Transactions on Power Apparatus and Systems*, Cidade do México, v. PAS-97, n. 4, p. 1018-1029, jul/ago. 1978.

[6] PADIYAR, K. R.; PAI, M. A.; RADHAKRISHNA, C. A Versatile System Model For The Dynamic Stability Analysis of Power Systems Including HVDC Links. *IEEE, Transactions on Power Apparatus and Systems*, Minnesota, v. PAS-100, n. 4, p. 1871-1880, abr. 1981.

[7] VOVOS, N.; GALANOS, G.; GIANNAKOPOULOS, G. A Mathematical Model for Dynamic Simulation of HVDC Systems. *IEEE, Transactions on Power Apparatus and Systems*, Nova York, v. PAS-102, n. 6, p. 1755-1763, jun. 1983.

[8] ZHOU, B. Steady-State Stability Analisys of HVDC Systems with Digital Control. *IEEE, Power Engineering Review*, Philadelphia, p. 51, jun. 1983.

[9] NI, Y. X.; FOUAD, A. A. A SIPLIFIED TWO-TERMINAL HVDC MODEL AND ITS USE IN DIRECT TRANSIENT STABILITY ASSESSMENT. *IEEE, Transactions on Power Systems*, Nova Orleans, v. PWRS-2, n. 4, p. 1006-1012, nov. 1987.

[10] JOHNSON, B. K. HVDC MODELS USED IN STABILITY STUDIES. IEEE *Transactions on Power Delivery*, Oregon, v. 4, n. 2, abr. 1989.

[11] DICKMANDER, D. L.; PETERSON, K. J.; Analysis of DC Harmonics Using the Three-Pulse Model for the Intermountain Power Project HVDC Ttransmission. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Oregon, v.4, n.2, p. 1195-1202, abr. 1989.

[12] EINARSSON, O.; PETERSON, K. J.; SHOCKLEY, P. R. Intermountain Power Project Carrier Interference Study. *IEEE, Power Engineering Review*, p. 80-81, abr. 1989.

[13] SHORE, N. L.; ANDERSSON, G.; CANELHAS, A. P.; ASPLUND, G. A Three-Pulse Model of D.C. Side Harmonic Flow in HVDC Systems. *IEEE, Power Engineering Review*, p. 81, jul. 1989.

[14] XU, W.; DRAKOS, J. E.; MANSOUR, Y.; CHANG, A. A Three-Phase Converter Model For Harmonic Analysis Of HVDC Systems. *IEEE transactions on Power Delivery*, Nova York, v.9, n.3, p. 1724-1731, jul. 1994.

[15] DINH, Q. N.; ARRILLAGA, J.; SMITH, B. C. Steady – state model of direct connected generator – HVdc converter units in the harmonic domain. *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib*, v. 145, n. 5, p. 559-565, set. 1998.

[16] ARABI, S.; KUNDUR, P.; SAWADA, J. H. APPROPRIATE HVDC TRANSMISSION SIMULATION MODELS FOR VARIOUS POWER SYSTEM STABILITY STUDIES. *IEEE Transactions on Power System*, v. 13, n. 4, p. 1292-1297, nov. 1998.

[17] TANG, L.; RAGHUVEER, M. R. Modelling of HVDC Wall Bushing Flashover Due to Uneven Wetting. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, n. 1, p. 194- 199, jan. 1999.

[18] JOVCIC, D.; PAHALAWATHTHA, N.; ZAVAHIR, M. Analytical Modelling of HVDC-HVAC Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, n. 2, p. 506-511, abr. 1999.

[19] BATHURST, G. N.; SMITH, B. C.; WATSON, N. R.; ARRILLAGA, J. Modelling of HVDC Transmission Systems in the Harmonic Domain. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, n. 3, p. 1075-1080, jul. 1999.

[20] AIK, D. L. H.; ANDERSSON, G. *Impact* of Dynamic System Modelling on the Power Stability of HVDC Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, n. 4, p. 1427-1437, out. 1999.

[21] BATHURST, G. N.; WATSON, N. R.; ARRILLAGA, J. Modeling of Bipolar HVdc Links in the Harmonic Domain. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 15, n. 3, p. 1034-1038, jul. 2000.

[22] HAMMONS, T. J.; GOH, M. W. Turbine, Generator, System Modeling and Impact of Variable – Frequency Ripple Currents on Torsional Stressing of Generators in Poland and Sweden: Lithuania/Poland and Sweden/Poland HVDC Links. *IEEE Transactions on Energy Conservation*, v. 15, n. 4, p. 384-394, dez. 2000.

[23] OSAUSKAS, C. M.; HUME, D. J.; WOOD, A. R. Small Signal Frequency Domain Model of an HVDC Converter. *IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib*., v. 148, n. 6, p. 573-578, nov. 2001.

[24] WOOD, A. R.; OSAUSKAS, C. M.; HUME, D .J. Small Signal Modelling of HVDC Transmission Systems. *IEEE AC – DC Power Transmission, Conference Publication*, n. 485, p. 107-112, nov. 2001.

[25] MADRIGAL, M.; ACHA, E. Harmonic Modelling of Voltage Source Converters for HVDC Stations. Universidade de Glasgow. *IEEE AC-DC Transmission, Conference Publication*, Escócia, UK, n. 485, p. 125-131, nov. 2001.

[26] OSAUSKAS, C.; WOOD, A. Small – Signal Dynamic Modeling of HVDC Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 18, n. 1, p. 220-225, jan. 2003.

[27] HUME, D. J.; WOOD, A. R.; OSAUSKAS, C. M. Frequency – Domain Modelling of Interharmonics in HVDC Systems. *IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib*, v. 150, n. 1, p. 41-48, jan. 2003.

[28] ZHANG, X. P. Multiterminal Voltage – Sourced Converter – Based HVDC Models for Power Flow Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 19, n. 4, p. 1877-1884, nov. 2004.

[29] YANG, X.; CHEN, C. HVDC Dynamic modeling for small signal analysis. *IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, v. 151, n. 6, p. 740-746, nov. 2004.

[30] PADIYAR, K. R.; PRABHU, N. Modelling, Control design and Analysis of VSC based HVDC Transmission Systems. *IEEE, International Conference on Power System Tecnology - POWERCON*, Singapura, p. 774-779, nov. 2004.

[31] FARUQUE, M. O.; ZHANG, Y.; DINAVAHI, V. Detailed Modeling of CIGRÉ HVDC Benchmark System Using PSCAD/EMTDC and PSB/SIMULINK. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 21, n. 1, p. 378-387, jan. 2006.

[32] BRANDT, R. M.; ANNAKKAGE, U. D.; BRANDT, D. P.; KSHATRIYA, N. Validation of a Two-Time Step HVDC Transient Stability Simulation Model including Detailed HVDC Controls and DC Line L/R Dynamics. IEEE, Manitoba, 2006.

[33] MAURICIO, J. M.; EXPOSITO, A. G. Modeling and Control of an HVDC-VSC Transmission System. IEEE, 2006.

[34] CHAO, Z.; XIAOXIN, Z.; RUOMEI. L. Dynamic Modeling and Transient Simulation for VSC Based HVDC in Multi – Machine System. *IEEE, International Conference on Power System Technology*, 2006.

[35] MARTINEZ, A. P.; ESQUIVEL, C. R. F.; PÉREZ, H. A.; ACHA, E. Modeling of VSC – Based HVDC Systems for a Newton – Raphson OPF Algorithm. *IEEE, Transactions on Power Systems*, México, v. 22, n. 4, p. 1794-1803, nov. 2007.

[36] DING, H.; HAN, M. X.; CHEN, Q.; YIN, W. Y.; LIU, B. H. Detailed Modeling of China-Russia Heihe Back-to-Back HVDC Project Using PSCAD/EMTDC. Nanjing, China, p. 1916-1921, 6-9 abr. 2008.

[37] LIU, J.; HAN, M.; CHEN, X. Development of VSC HVDC Quasi – Steady – State Model and Its Application.

[38] OYEDOKUN, D. T.; FOLLY, K. A.; CHOWDHURY, S. P. Effect of Converter DC fault on the Transient Stability of a Multi – Machine Power System with HVDC Transmission lines. Nairobi, Kenya, 23-25 set. 2009.

[39] FERNANDES, B. S. *Elos de Transmissão em Corrente Contínua em Programas de Estabilidade Transitória.* 2005. 132 f. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2005. Disponível em: <www.pee.**ufrj**.br/teses/?Resumo=2005041401>. Acesso em: 15 de mar. 2010.

[40] *Fontes Harmônicas.* Universidade Estadual Paulista. Disponível em: <www.dee.feis.unesp.br/qualienergi/dados/bioriga2.pdf>. Acesso em: 29 de abr. 2010.

[41] FILHO, S. A. *Análise de Controladores Eletrônicos em Sistemas de Distribuição de Energia.* 2005. 194 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. 2005. Disponível em: <www.dee.feis.unesp.br/pos/teses/arquivos/156-dissertacao_sergio_alampi_filho.pdf>. Acesso em: 22 de mar. 2011.

[42] CÁRDENAS, S. L. E. *ASPECTOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS DA UTILIZAÇÃO DOS CONTROLADORES FACTS NA OPERAÇÃO DOS SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA*. 2005. 222 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, Maranhão. 2005. Disponível em: <www.tedebc.ufma.br/.../Sergio%20Leon%20Escalante%20Cardenas....>. Acesso em: 10 de dez. 2011.

[43] MATLAB®, The Language of Technical Computing. Versão 7.5.0.342 (R2007b), 1984 - 2007. Disponível em: <www.mathworks.com/patents>.