



## CONEXÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS SÍNCRONOS OU ASSÍNCRONOS UTILIZANDO O TRANSFORMADOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL

Antonio Felipe da Cunha de Aquino

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientadores:     Edson Hirokazu Watanabe  
                          Maurício Aredes

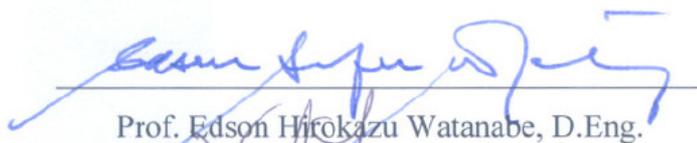
Rio de Janeiro  
Junho de 2012

CONEXÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS SÍNCRONOS OU ASSÍNCRONOS  
UTILIZANDO O TRANSFORMADOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL

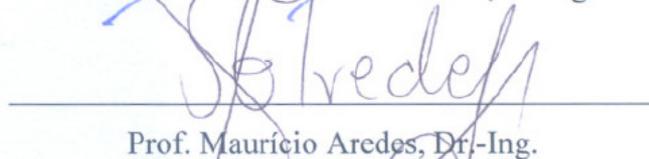
Antonio Felipe da Cunha de Aquino

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

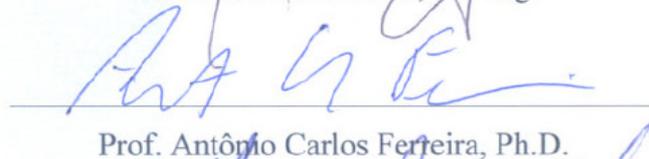
Examinada por:



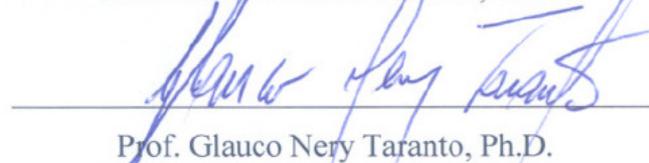
Prof. Edson Hirokazu Watanabe, D.Eng.



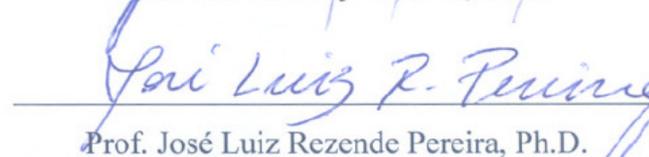
Prof. Maurício Aredes, Dr.-Ing.



Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D.



Prof. Glauco Nery Taranto, Ph.D.



Prof. José Luiz Rezende Pereira, Ph.D.



Dr. Nelson Martins, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2012

Aquino, Antonio Felipe da Cunha de

Conexão de Sistemas Elétricos Síncronos ou Assíncronos utilizando o Transformador de Frequência Variável/Antonio Felipe da Cunha de Aquino. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

XIX, 146 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Edson Hirokazu Watanabe  
Maurício Aredes

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 138-141.

1. Transformador de Frequência Variável. 2. Interligação de Sistemas Elétricos. 3. Dispositivos FACTS. I. Watanabe, Edson Hirokazu *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Aos meus pais Theodósio e Maria Helena*  
*Aos meus filhos Pedro Felipe, João Rafael, Thiago, Isabella e Tomás*  
*À minha amada Taiana, esposa e companheira*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, professores Edson Hirokazu Watanabe e Maurício Aredes, por alimentarem a chama do conhecimento em minha alma. Por me ajudarem a trilhar o longo caminho da formação acadêmica, com paciência, dedicação e exigência, com luzes e sugestões precisas. Serei sempre muito agradecido.

Ao Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, pelo apoio que me concedeu para realização deste trabalho, sem o qual não teria sido possível conciliar as atividades profissionais e acadêmicas.

Agradeço a ajuda e o incentivo de amigos que estiveram sempre ao meu lado nestes anos de trabalho de tese: David do Nascimento Gonçalves, Maurício Campos Passaro, Elder Geraldo Sales de Sant’ana, Mamour Sop Ndiaye, Jose de Alencar Silva Junior, Fernando Machado Silva, Adriano de Andrade Barbosa e Arjan Carvalho Vinhaes.

Agradeço a Deus, por ter corrido o risco de trazer-me à existência e por todas as graças que me concedeu até aqui.

Agradeço aos meus pais, Theodósio de Aquino e Maria Helena da Cunha, pela profunda dedicação que sempre dispensaram a mim e a meus irmãos. Por apontarem o caminho certo e por nos ajudarem a trilhá-lo.

Aos meus filhos, Pedro Felipe, João Rafael, Thiago, Isabella e Tomás – todos Viviani de Aquino, por me fazerem querer ser melhor. Pelos seus sorrisos, suas lágrimas, seus esforços, suas vitórias e conquistas.

A minha esposa Taiana, pelo amor, pelo Amor, pelo AMOR... e por tudo mais que dessa fonte foi brotando. Taiana, você é o grande AMOR da minha vida.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

## CONEXÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS SÍNCRONOS OU ASSÍNCRONOS UTILIZANDO O TRANSFORMADOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL

Antonio Felipe da Cunha de Aquino

Junho/2012

Orientadores: Edson Hirokazu Watanabe  
Maurício Aredes

Programa: Engenharia Elétrica

O Transformador de Frequência Variável, ou VFT (do inglês *Variable Frequency Transformer*), é um equipamento que permite transferir energia entre sistemas elétricos síncronos ou assíncronos, estabelecendo fluxo de potência ativa em ambos os sentidos, de forma controlada. O equipamento está baseado em uma máquina elétrica com enrolamentos trifásicos no estator e no rotor, em cujo eixo aplica-se torque por meio de um sistema de acionamento eletrônico.

Nesta tese, foi analisada a viabilidade da aplicação do VFT no Sistema Interligado Nacional (SIN), tendo como foco o desempenho dinâmico do sistema elétrico. Para tanto, desenvolveu-se um novo modelo digital do VFT no ANATEM, programa de simulação de transitórios eletromecânicos utilizado nos estudos de planejamento da expansão e de planejamento e programação da operação do sistema elétrico brasileiro. O modelo foi validado através de resultados de simulação obtidos no programa de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC, considerando a representação detalhada dos componentes do VFT. Como contribuição adicional, o trabalho apresenta a proposta de um controlador para o VFT, incluindo sua estrutura e ajustes.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

CONNECTION OF SYNCHRONOUS OR ASYNCHRONOUS ELECTRIC  
SYSTEM USING VARIABLE FREQUENCY TRANSFORMERS

Antonio Felipe da Cunha de Aquino

June/2012

Advisors: Edson Hirokazu Watanabe  
Maurício Aredes

Department: Electrical Engineering

The Variable Frequency Transformer (VFT) is a device that allows energy transfer between synchronous or asynchronous electrical systems, establishing active power flow in both directions, in a controlled manner. The device is based on an electrical machine with three-phase windings on the stator and rotor, in which torque is applied on the shaft through an electronic drive system.

In this thesis, the feasibility of applying the VFT in the Brazilian Grid was analyzed, focusing on the dynamic performance of the electrical system. For this purpose, a new digital model of the VFT was developed on ANATEM, electromechanical transient program used in studies of expansion planning and scheduling and planning of the operation of the Brazilian Grid. The model was validated using simulation results obtained in electromagnetic transient program PSCAD/EMTDC, considering the detailed representation of the components of the VFT. As an additional contribution, the thesis presents a proposal for a controller for the VFT, including its structure and settings.

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	O TRANSFORMADOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL .....	1
1.2	IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA .....	10
1.3	OBJETIVO DA TESE .....	12
1.4	DESENVOLVIMENTO DA TESE .....	12
<b>2</b>	<b>A INTERLIGAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS COM O TRANSFORMADOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL.....</b>	<b>14</b>
2.1	A INTERLIGAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS.....	14
2.1.1	Interligações em corrente alternada.....	15
2.1.2	Interligações em corrente contínua.....	17
2.1.3	Interligações utilizando máquinas rotativas .....	19
2.2	MODELO MATEMÁTICO DO TRANSFORMADOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL .....	20
2.2.1	Equações de tensão na MIDA em coordenadas <i>abc</i> .....	22
2.2.2	Equações de torque na MIDA em coordenadas <i>abc</i> .....	25
2.2.3	Equações de tensão na MIDA para referencial <i>dq0</i> genérico.....	26
2.2.4	Equações de torque na MIDA para referencial <i>dq0</i> genérico.....	29
2.2.5	Equações de tensão na MIDA para regime permanente senoidal .....	29
2.2.6	Equações de torque na MIDA para regime permanente senoidal .....	30
2.3	FUNCIONAMENTO DO TRANSFORMADOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL.....	31
2.3.1	Velocidade do rotor vs. diferença entre as frequências .....	31
2.3.2	Potência ativa vs. torque eletromagnético .....	32
2.3.3	Torque eletromagnético vs. torque externo aplicado.....	36
2.3.4	Potência ativa vs. defasagem angular imposta pelo VFT .....	37
2.3.5	Controle do fluxo de potência no VFT.....	39
2.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	40
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DE MODELO DO VFT PARA SIMULAÇÃO DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS .....</b>	<b>41</b>
3.1	CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO MODELO DO VFT .....	41
3.1.1	Sistema de sincronismo do VFT .....	43

3.1.2	Sistema de controle do VFT .....	44
3.1.3	Sistemas equivalentes.....	45
3.2	DESEMPENHO DO VFT NA CONEXÃO DE SISTEMAS SÍNCRONOS .....	46
3.2.1	Degrau na referência de potência do VFT (caso 1).....	46
3.2.2	Abertura da interligação em corrente alternada (caso 2).....	52
3.3	DESEMPENHO DO VFT NA CONEXÃO DE SISTEMAS ASSÍNCRONOS .....	55
3.3.1	Degrau na referência de potência do VFT (caso 3).....	55
3.3.2	Degrau na referência de potência do VFT (caso 4).....	60
3.3.3	Degrau na referência de potência do VFT (caso 5).....	63
3.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	65
<b>4</b>	<b>OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DINÂMICO DO VFT.....</b>	<b>66</b>
4.1	MODELO LINEAR DO VFT E REDE ELÉTRICA.....	66
4.1.1	Características gerais do sistema modelado .....	66
4.1.2	Parâmetros do sistema analisado.....	68
4.1.3	Modelo da rede elétrica e do VFT operando em malha aberta.....	69
4.1.4	Modelo da rede elétrica e do VFT, com controlador P .....	70
4.1.5	Modelo da rede elétrica e do VFT, com controlador PI.....	72
4.1.6	Modelo da rede elétrica e do VFT, controle PI e estabilizador .....	74
4.2	VALIDAÇÃO DOS AJUSTES DE CONTROLE OBTIDOS .....	77
4.2.1	Ajuste do modelo completo no PSCAD/EMTDC.....	77
4.2.2	Caso 6, com ganhos ( $k_p=8,5 / k_I=5,5 / k_{PSS}=1000$ ).....	79
4.2.3	Caso 7, com ganhos ( $k_p=8,5 / k_I=5,5 / k_{PSS}=300$ ).....	84
4.2.4	Caso 2, com ganhos ( $k_p=16 / k_I=100 / k_{PSS}=300$ ).....	86
4.3	ESTRUTURA E FAIXAS DE AJUSTES PARA O CONTROLADOR DO VFT .....	86
4.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	87
<b>5</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DE MODELO DO VFT PARA SIMULAÇÃO DE TRANSITÓRIOS ELETROME CÂNICOS.....</b>	<b>89</b>
5.1	O MODELO DO VFT PROPOSTO .....	89
5.1.1	Compatibilização com o modelo da rede CA.....	90
5.1.2	Balanco de energia no VFT.....	90
5.1.3	Estrutura do modelo .....	91
5.1.4	Implementação no programa ANATEM.....	93

5.2	DESEMPENHO DO MODELO PROPOSTO.....	93
5.2.1	Conexão assíncrona entre sistemas ideais (Caso 1) .....	94
5.2.2	Conexão assíncrona entre sistemas 2000 MVA de Ncc (Caso 2) .....	97
5.2.3	Conexão assíncrona com desvio de frequência (Caso 3) .....	101
5.3	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	104
<b>6</b>	<b>APLICAÇÕES DO TRANSFORMADOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL NO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL .....</b>	<b>105</b>
6.1	CONFIGURAÇÃO 1: CONEXÃO DA UHE SANTO ANTÔNIO AO SISTEMA ACRE/RONDÔNIA .....	106
6.1.1	Inicialização da simulação dinâmica.....	108
6.1.2	Contingência 1: Curto-circuito monofásico na SE Porto Velho .....	109
6.1.3	Contingência 2: Curto-circuito na SE Porto Velho, eliminado pela abertura da LT 230 kV Porto Velho/Abunã.....	113
6.1.4	Contingência 3: Curto-circuito na SE Porto Velho, eliminado com a abertura da LT 230 kV Porto Velho/Abunã, seguido de redução da ordem de potência no VFT .....	117
6.1.5	Contingência 4: Curto-circuito na SE Samuel, eliminado em 150 ms com a abertura da LT 230 kV Samuel/Ariquemes.....	121
6.2	CONEXÃO DAS UHE SANTO ANTÔNIO E JIRAU À REGIÃO SUDESTE E AO SISTEMA ACRE/RONDÔNIA .....	124
6.2.1	Inicialização da simulação dinâmica.....	126
6.2.2	Contingência 5: Curto-circuito na SE Porto Velho, eliminado pela abertura da LT 230 kV Porto Velho/Abunã C1 .....	127
6.2.3	Contingência 6: Bloqueio de um polo do sistema HVDC Coletora Porto Velho / Araraquara 2.....	130
6.3	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	133
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>135</b>
7.1	CONSTATAÇÕES FINAIS .....	135
7.2	CONTRIBUIÇÕES DA TESE .....	135
7.3	TRABALHOS FUTUROS .....	137
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>138</b>
	<b>APÊNDICE .....</b>	<b>142</b>

# Lista de Figuras

Figura 1-1: Diagrama esquemático do VFT. ....	2
Figura 1-2: Modelo do VFT para simulação de transitórios eletromecânicos [24]. ....	9
Figura 2-1: Intercâmbio entre sistemas elétricos conectados de forma síncrona. ....	16
Figura 2-2: Interligações possíveis com a MIDA (VFT): (a) assíncrona; (b) síncrona. ....	21
Figura 2-3: Diagrama esquemático do VFT. ....	21
Figura 2-4: Diagrama esquemático de uma Máquina de Indução de Dupla Alimentação. ....	22
Figura 2-5: (a) Posição relativa dos enrolamentos do estator e do rotor; (b) representação esquemática com indicação das grandezas elétricas [34]. .....	23
Figura 2-6: Representação esquemática da transformação de coordenadas $abc-dq0$ , considerando um referencial girante arbitrário [34]. ....	27
Figura 2-7: Balanço de potência no VFT. ....	33
Figura 2-8: Balanço de energia no VFT em função da diferença de frequência. ....	35
Figura 2-9: Circuito equivalente do VFT para regime permanente, com $\omega_2 - \omega_1 = 0$ , desprezando as perdas ôhmicas no rotor e estator. ....	38
Figura 2-10: Diagrama fasorial do VFT, com $\omega_2 - \omega_1 = 0$ , desprezando as perdas ôhmicas no rotor e estator. ....	38
Figura 3-1: Elementos principais do VFT. ....	41
Figura 3-2: Diagrama lógico do esquema de sincronização do VFT. ....	44
Figura 3-3: Estrutura básica do sistema de controle implementado no modelo. ....	44
Figura 3-4: Diagrama unifilar geral do sistema equivalente 1. ....	45
Figura 3-5: Interligação de sistemas síncronos com o VFT. ....	46
Figura 3-6: Conexão síncrona (caso 1) – Sinal de referência e potência ativa no VFT. ....	47
Figura 3-7: Conexão síncrona (caso 1) – Sinal de referência e potência ativa no VFT. ....	47
Figura 3-8: Conexão síncrona (caso 1) – Potência ativa na interligação CA e no VFT. .....	48
Figura 3-9: Conexão síncrona (caso 1) – Defasagem angular $\theta_{VFT}$ (graus). ....	48
Figura 3-10: Conexão síncrona (caso 1) – Potência mecânica entregue ao VFT. ....	49
Figura 3-11: Conexão síncrona (caso 1) – Velocidade do rotor do VFT (em rpm). ....	50
Figura 3-12: Conexão síncrona (caso 1) – Torque $T_D$ aplicado ao eixo do VFT (pu). ....	51

Figura 3-13: Conexão síncrona (caso 1) – Valor eficaz das tensões no sistema (em pu). .....	51
Figura 3-14: Conexão síncrona (caso 2) – Sinal de referência e potência ativa no VFT. .....	52
Figura 3-15: Conexão síncrona (caso 2) – Potência ativa na interligação CA e no VFT. .....	53
Figura 3-16: Conexão síncrona (caso 2) – Defasagem angular $\theta_{VFT}$ (graus).....	53
Figura 3-17: Conexão síncrona (caso 2) – Velocidade do rotor do VFT (em rpm). ....	54
Figura 3-18: Conexão síncrona (caso 2) – Valor eficaz das tensões no sistema. ....	54
Figura 3-19: Interligação de sistemas assíncronos com o VFT.....	55
Figura 3-20: Conexão assíncrona (caso 3) – Sinal de referência e potência ativa. ....	56
Figura 3-21: Conexão assíncrona (caso 3) – Defasagem angular $\theta_{VFT}$ (graus). ....	57
Figura 3-22: Conexão assíncrona (caso 3) – Potência mecânica no eixo do VFT.....	57
Figura 3-23: Conexão assíncrona (caso 3) – Velocidade do rotor do VFT (em rpm)...	58
Figura 3-24: Conexão assíncrona (caso 3) – Torque $T_D$ aplicado ao eixo do VFT (pu). .....	58
Figura 3-25: Conexão assíncrona (caso 3) – Torque $T_D$ aplicado ao eixo do VFT.....	59
Figura 3-26: Conexão assíncrona (caso 3) – Tensões no sistema 2 (em kV).....	59
Figura 3-27: Conexão assíncrona (caso 3) – Corrente no rotor do VFT (em kA).....	60
Figura 3-28: Conexão assíncrona (caso 4) – Sinal de referência e potência ativa. ....	61
Figura 3-29: Conexão assíncrona (caso 4) – Defasagem angular $\theta_{VFT}$ (graus). ....	61
Figura 3-30: Conexão assíncrona (caso 4) – Velocidade do rotor do VFT (em rpm)...	62
Figura 3-31: Conexão assíncrona (caso 4) – Valor eficaz da tensão nos sistemas 1 e 2 (em pu).....	62
Figura 3-32: Conexão assíncrona (caso 5) – Sinal de referência e potência ativa. ....	63
Figura 3-33: Conexão assíncrona (caso 5) – Defasagem angular no VFT (graus).....	64
Figura 3-34: Conexão assíncrona (caso 5) – Potência mecânica no eixo do VFT.....	64
Figura 3-35: Conexão assíncrona (caso 5) – Velocidade do rotor do VFT (em rpm)...	65
Figura 4-1: Modelo da rede elétrica e da máquina principal do VFT. ....	67
Figura 4-2: Sistema de controle e representação da dinâmica do rotor do VFT. ....	67
Figura 4-3: Diagrama de blocos para sistema em malha aberta.....	69
Figura 4-4: Diagrama de blocos para sistema com controle tipo proporcional.....	71
Figura 4-5: Diagrama de blocos para sistema com controle PI.....	72
Figura 4-6: Polos do sistema, controlador PI, $k_I = 1$ e $k_P$ variando de 0 a 100.....	73

Figura 4-7: Polos do sistema, controlador PI, $k_p = 1$ e $k_i$ variando de 0 a 100. ....	73
Figura 4-8: Diagrama de blocos para sistema com controle PI e sinal estabilizador. ....	74
Figura 4-9: $P_{REF}(t)$ e $P_{VFT}(t)$ [ $k_p=16 / k_i=100 / k_{PSS}=300$ ]. ....	76
Figura 4-10: $P_{REF}(t)$ e $P_{VFT}(t)$ [ $k_p=8,5 / k_i=5,5 / k_{PSS}=1000$ ]. ....	76
Figura 4-11: Estrutura básica de controle considerada nas simulações PSCAD/EMTDC para validação do modelo linear. ....	78
Figura 4-12: Potências $P_{REF}$ e $P_{VFT}$ (em MW) – Degrau unitário em $P_{REF}$ , Caso 6. ....	79
Figura 4-13: $T_D$ (em pu) e $T_E$ (em pu) – Degrau unitário em $P_{REF}$ , Caso 6. ....	80
Figura 4-14: Velocidade do rotor $\omega_m$ (em rpm) – Degrau unitário em $P_{REF}$ , Caso 6. ...	81
Figura 4-15: Defasagem angular $\theta_{VFT}$ (em graus) – Degrau unitário em $P_{REF}$ , Caso 6. ....	82
Figura 4-16: Perfil de tensão (em pu) – Degrau unitário em $P_{REF}$ , Caso 6. ....	82
Figura 4-17: $T_E - P_{EST}$ (em pu) – Degrau unitário em $P_{REF}$ , Caso 6. ....	83
Figura 4-18: Potências $P_{REF}$ e $P_{VFT}$ (em MW) – Degrau unitário em $P_{REF}$ , Caso 7. ....	84
Figura 4-19: $T_D$ (em pu) e $T_E$ (em pu) – Degrau unitário em $P_{REF}$ , Caso 7. ....	85
Figura 4-20: Velocidade do rotor $\omega_m$ (em rpm) – Degrau unitário em $P_{REF}$ , Caso 7. ...	85
Figura 4-21: Potências $P_{REF}$ e $P_{VFT}$ (em MW) – Degrau unitário em $P_{REF}$ , Caso 2. ....	86
Figura 4-22: Estrutura básica de controle proposta. ....	87
Figura 5-1: Estrutura do modelo do VFT para simulação de transitórios eletromecânicos no ANATEM. ....	91
Figura 5-2: Sistema considerado no Caso 1: (a) impedâncias; (b) fluxo de potência. ..	94
Figura 5-3: Potência de referência ( $P_{REF}$ ) e na interligação ( $P_{VFT}$ ). ....	95
Figura 5-4: Potência reativa nos terminais de estator e rotor (em Mvar). ....	95
Figura 5-5: Torque eletromagnético ( $T_E$ ) e torque aplicado ( $T_D$ ). ....	96
Figura 5-6: Defasagem angular $\theta_{VFT}$ (graus). ....	96
Figura 5-7: Velocidade do rotor (em rpm). ....	97
Figura 5-8: Potência mecânica no eixo do VFT (em MW). ....	97
Figura 5-9: Sistema considerado no Caso 2: (a) impedâncias; (b) fluxo de potência. ..	98
Figura 5-10: Potência de referência ( $P_{REF}$ ) e na interligação ( $P_{VFT}$ ). ....	98
Figura 5-11: Potência reativa nos terminais de estator e rotor (em Mvar). ....	99
Figura 5-12: Torque eletromagnético ( $T_E$ ) e torque aplicado ( $T_D$ ). ....	99
Figura 5-13: Defasagem angular $\theta_{VFT}$ (graus). ....	100
Figura 5-14: Velocidade do rotor (em rpm). ....	100
Figura 5-15: Perfil de tensão nos terminais de estator e rotor (em pu). ....	101

Figura 5-16: Sistema considerado no Caso 3: (a) impedâncias; (b) fluxo de potência. .....	101
Figura 5-17: Potência de referência ( $P_{REF}$ ) e na interligação ( $P_{VFT}$ ). .....	102
Figura 5-18: Frequência elétrica nos sistemas 1 e 2 (em Hz).....	102
Figura 5-19: Torque eletromagnético ( $T_E$ ) e torque aplicado ( $T_D$ ). .....	103
Figura 5-20: Defasagem angular $\theta_{VFT}$ (graus). .....	103
Figura 5-21: Velocidade do rotor (em rpm). .....	104
Figura 6-1: Fronteiras para potenciais interligações síncronas e assíncronas. ....	105
Figura 6-2: Configuração 1: UHE Santo Antônio conectadas ao Sistema Acre/Rondônia por uma estação VFT. ....	106
Figura 6-3: Configuração 1: Perfil de tensão, fluxos de potência ativa e reativa.....	107
Figura 6-4: Inicialização do sistema e do VFT: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no rotor do VFT. ....	109
Figura 6-5: Contingência 1: Tensão na SE Coletora Porto Velho 500 kV e na SE Porto Velho 230 kV (em pu). ....	109
Figura 6-6: Contingência 1: Frequência nas unidades geradoras da UHE Santo Antônio e UHE Samuel (em Hz). ....	110
Figura 6-7: Contingência 1: Potência ativa de referência e Potência no VFT (em MW). .....	110
Figura 6-8: Contingência 1: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no estator do VFT.....	111
Figura 6-9: Contingência 1: Potência ativa (em MW) no rotor do VFT. ....	111
Figura 6-10: Contingência 1: Potência reativa (em Mvar) no rotor do VFT.....	112
Figura 6-11: Contingência 1: Velocidade do rotor do VFT (em rpm). ....	112
Figura 6-12: Contingência 1: Defasagem angular entre os rotores das UHE Santo Antônio e Samuel e Defasagem angular no VFT (em graus). ....	113
Figura 6-13: Contingência 2: Tensão na SE Coletora Porto Velho 500 kV e na SE Porto Velho 230 kV (em pu). ....	113
Figura 6-14: Contingência 2: Frequência nas unidades geradoras da UHE Santo Antônio e UHE Samuel (em Hz). ....	114
Figura 6-15: Contingência 2: Potência ativa de referência e Potência no VFT (em MW).....	114
Figura 6-16: Contingência 2: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no estator do VFT.....	115

Figura 6-17: Contingência 2: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no rotor do VFT.....	115
Figura 6-18: Contingência 2: Velocidade do rotor do VFT (em rpm). ....	116
Figura 6-19: Contingência 2: Defasagem angular entre os rotores das unidades geradoras das UTE Termonorte e UHE Samuel (em graus).....	116
Figura 6-20: Contingência 3: Tensão na SE Ariquemes 230 kV (em pu) – comparação Com e Sem Redução da Ordem de Potência no VFT.....	117
Figura 6-21: Contingência 3: Frequência nas unidades geradoras da UHE Santo Antônio e UHE Samuel (em Hz). ....	118
Figura 6-22: Contingência 3: Potência elétrica (em MW) nas máquinas da UHE Santo Antônio [grupos 1 e 2]. ....	118
Figura 6-23: Contingência 3: Potência ativa de referência e Potência no VFT (em MW).....	119
Figura 6-24: Contingência 3: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no estator do VFT.....	119
Figura 6-25: Contingência 3: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no rotor do VFT.....	119
Figura 6-26: Contingência 3: Potência mecânica no eixo do VFT (MW).....	120
Figura 6-27: Contingência 3: Velocidade do rotor do VFT (em rpm). ....	120
Figura 6-28: Contingência 3: Defasagem angular entre os rotores das unidades geradoras das UTE Termonorte e centro de massa (em graus) – comparação Com e Sem Redução da Ordem de Potência no VFT. ....	121
Figura 6-29: Contingência 4: Tensão na SE Coletora Porto Velho 500 kV e na SE Porto Velho 230 kV (em pu). ....	121
Figura 6-30: Contingência 4: Frequência nas unidades geradoras da UHE Santo Antônio e UHE Samuel (em Hz). ....	122
Figura 6-31: Contingência 4: Potência ativa de referência e no VFT (em MW). ....	122
Figura 6-32: Contingência 4: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no estator do VFT.....	123
Figura 6-33: Contingência 4: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no rotor do VFT.....	123
Figura 6-34: Contingência 4: Velocidade do rotor do VFT (em rpm). ....	123

Figura 6-35: Configuração 2: UHE Santo Antônio e Jirau conectadas à região Sudeste por dois bipolos de corrente contínua e ao Sistema Acre/Rondônia por estação VFT. ....	124
Figura 6-36: Configuração 2: Perfil de tensão, fluxos de potência ativa e reativa.....	125
Figura 6-37: Inicialização do sistema e do VFT: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no rotor do VFT.....	127
Figura 6-38: Contingência 5: Tensão na SE Coletora Porto Velho 500 kV e na SE Porto Velho 230 kV (em pu). ....	127
Figura 6-39: Contingência 5: Frequência nas unidades geradoras da UHE Santo Antônio e UHE Samuel (em Hz). ....	128
Figura 6-40: Contingência 5: Potência ativa de referência e Potência no VFT (em MW).....	128
Figura 6-41: Contingência 5: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no estator do VFT.....	129
Figura 6-42: Contingência 5: Potência ativa (em MW) no rotor do VFT. ....	129
Figura 6-43: Contingência 5: Velocidade do rotor do VFT (em rpm). ....	129
Figura 6-44: Contingência 5: Potência no sistema de transmissão em CC Coletora Porto Velho / Araraquara 2 (MW, por polo). ....	130
Figura 6-45: Contingência 6: Tensão na SE Coletora Porto Velho 500 kV e na SE Porto Velho 230 kV (em pu). ....	130
Figura 6-46: Contingência 6: Frequência nas unidades geradoras da UHE Santo Antônio e UHE Samuel (em Hz). ....	131
Figura 6-47: Contingência 6: Potência ativa de referência e Potência no VFT (em MW).....	131
Figura 6-48: Contingência 6: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no estator do VFT.....	132
Figura 6-49: Contingência 6: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no rotor do VFT.....	132
Figura 6-50: Contingência 6: Velocidade do rotor do VFT (em rpm). ....	133
Figura 6-51: Contingência 6: Potência no sistema de transmissão em CC Coletora Porto Velho / Araraquara 2 (MW, por polo). ....	133

# Lista de Tabelas

Tabela 2-1: Resumo das expressões de potência e torque no VFT, na operação em regime permanente senoidal. ....	34
Tabela 3-1: Parâmetros utilizados no modelo de transitórios eletromagnéticos [24]....	42
Tabela 4-1: Parâmetros da rede elétrica e do VFT (valores em % na base 100 MVA)	69
Tabela 4-2: Polos e amortecimento do sistema considerando controle proporcional ...	71
Tabela 4-3: Polos e amortecimento do sistema considerando controle proporcional-integral e estabilizador .....	75
Tabela 4-4: Parâmetros adicionais necessários para o modelo PSCAD/EMTDC (valores em % na base 100 MVA).....	78
Tabela 4-5: Faixa de ajustes proposta para o controlador do VFT.....	87

# Lista de Símbolos

$\omega_{rm}$	Velocidade mecânica do rotor do VFT, em rad/s
$\eta_{rm}$	Velocidade mecânica do rotor do VFT, em rpm
$\theta_{VFT}$	Defasagem angular entre os campos de estator e rotor
$P_{VFT}$	Potência ativa que flui pelo VFT
$T_E$	Torque eletromagnético produzido no VFT
$T_D$	Torque mecânico aplicado ao eixo do VFT
$\mathbf{v}_{abcs}$	Tensões nos enrolamentos do estator (fases a, b e c)
$\mathbf{i}_{abcs}$	Correntes nos enrolamentos do estator (fases a, b e c)
$\lambda_{abcs}$	Enlaces de fluxo nos enrolamentos do estator (fases a, b e c)
$r_s$	Resistência dos enrolamentos do estator
$N_s$	Número de espiras dos enrolamentos do estator
$L_{ls}$	Indutância de dispersão dos enrolamentos do estator
$L_{ms}$	Indutância de magnetização dos enrolamentos do estator
$L_{sr}$	Amplitude da indutância mútua entre os enrolamentos do rotor e estator
$\mathbf{v}_{abcr}$	Tensões nos enrolamentos do rotor (fases a, b e c)
$\mathbf{i}_{abcr}$	Correntes nos enrolamentos do rotor (fases a, b e c)
$\lambda_{abcr}$	Enlaces de fluxo nos enrolamentos do rotor (fases a, b e c)
$r_r$	Resistência dos enrolamentos do rotor
$N_r$	Número de espiras dos enrolamentos do rotor
$L_{lr}$	Indutância de dispersão dos enrolamentos do rotor
$L_{mr}$	Indutância de magnetização dos enrolamentos do rotor
$\omega_r$	Velocidade elétrica do rotor do VFT, em rad/s
$\theta$	Deslocamento angular do referencial girante
$\omega$	Velocidade angular do referencial girante

$P_S$	Potência ativa que entra no VFT pelo estator
$P_R$	Potência ativa que entra no VFT pelo rotor
$P_D$	Potência mecânica que sai do VFT pelo eixo
$J$	Momento de inércia do VFT
$H$	Constante de inércia do VFT
$D$	Constante de amortecimento do VFT
$\theta_s$	Ângulos de fase das tensões aplicadas ao estator
$\theta_r$	Ângulos de fase das tensões aplicadas ao rotor
$\theta_m$	Defasagem angular do rotor em relação ao estator
$X_{EQ1}$	Reatância de curto-circuito do sistema equivalente 1
$X_{EQ2}$	Reatância de curto-circuito do sistema equivalente 2
$X_{TR1}$	Reatância de dispersão do transformador do sistema equivalente 1
$X_{TR2}$	Reatância de dispersão do transformador do sistema equivalente 2
$X_{VFT}$	Reatância de dispersão do VFT (estator + rotor)
$X_{MAG-VFT}$	Reatância de magnetização do VFT
$k_P$	Ganho proporcional do controlador do VFT
$k_I$	Ganho integral do controlador do VFT
$k_{PSS}$	Ganho do estabilizador do VFT

# 1 INTRODUÇÃO

As interligações entre sistemas elétricos permitem aproveitar a diversidade existente entre sistemas de grande porte, no que se refere aos custos de produção da energia elétrica em cada sistema, a aspectos ambientais específicos, à sazonalidade das cargas e das fontes primárias de energia. Além disso, de uma forma geral, a conexão de um ou mais sistemas elétricos conduz ao aumento da segurança eletroenergética global dos sistemas interligados.

As tecnologias atualmente disponíveis permitem implementar interligações em corrente alternada e em corrente contínua. São também viáveis interligações que utilizam máquinas elétricas rotativas. É o caso do Transformador de Frequência Variável, ou VFT (do inglês *Variable Frequency Transformer*), dispositivo cuja patente foi obtida por LARSEN, em 1999 [1]. Deve-se registrar que as bases conceituais e resultados experimentais de um dispositivo de mesmo tipo foram apresentadas por MOLINAS *et al.* [2] no mesmo ano de 1999.

Este capítulo apresenta a evolução histórica do VFT, tendo como base as principais referências bibliográficas disponíveis sobre o equipamento. O objetivo é o de apresentar os aspectos gerais do desenvolvimento e da aplicação do dispositivo, razão pela qual os aspectos teóricos do funcionamento do VFT serão apresentados nos capítulos subsequentes.

Além da revisão bibliográfica sobre o VFT, o capítulo apresenta a identificação dos problemas que são objetos desta tese de doutorado, os objetivos principais do trabalho e a forma como o texto está organizado.

## 1.1 O TRANSFORMADOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL

O VFT é um dispositivo que permite transferir energia entre sistemas elétricos assíncronos, podendo estabelecer fluxo de potência ativa em ambos os sentidos e de forma controlada. O dispositivo apresenta essa mesma funcionalidade no caso da conexão de dois pontos de um mesmo sistema elétrico síncrono, ou seja, pode operar em paralelo com outras interligações em corrente alternada.

O VFT está baseado em uma máquina elétrica com enrolamentos trifásicos no estator e no rotor. Nos terminais dessa máquina conectam-se, através de transformadores elevadores, os sistemas elétricos que se pretende interligar.

A Figura 1-1 apresenta o diagrama esquemático de um VFT típico. Na figura, os enrolamentos do estator da máquina principal estão conectados ao Sistema 2 através de um transformador elevador. A conexão dos enrolamentos do rotor da máquina principal ao Sistema 1 é feita através de anéis coletores e de outro transformador elevador. A figura apresenta ainda uma máquina auxiliar, acoplada mecanicamente ao eixo da máquina principal. A função dessa máquina auxiliar é a de aplicar torque no eixo da máquina principal, de forma a controlar a defasagem angular entre os campos do estator e do rotor, visando controlar o fluxo de potência ativa pelo VFT, ou seja, pela interligação entre os sistemas [2].

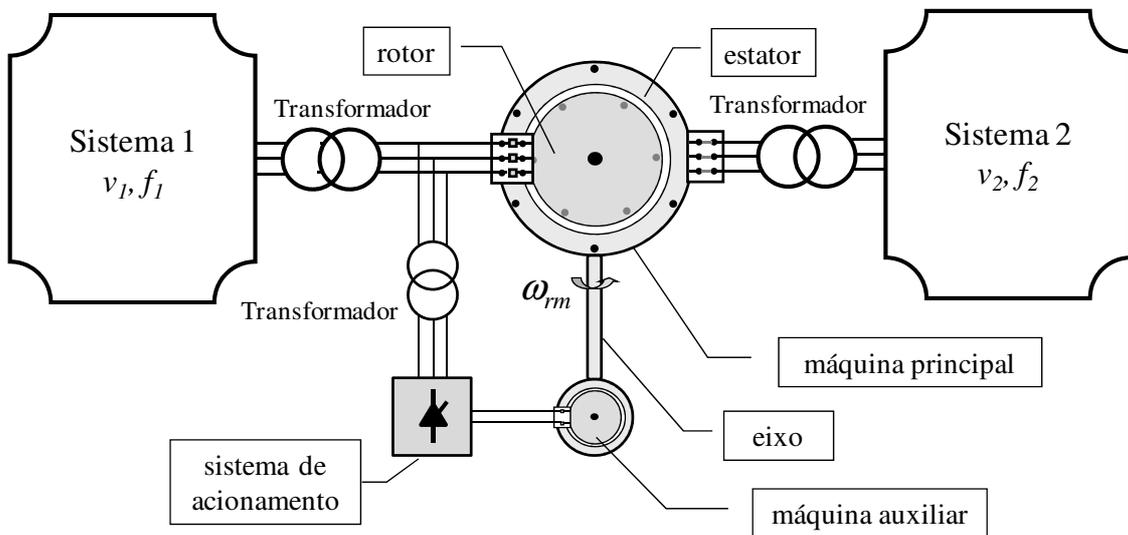


Figura 1-1: Diagrama esquemático do VFT.

As bases conceituais do funcionamento do VFT foram apresentadas na literatura científica por MOLINAS *et al.* [2] em 1999 e [3] em 2000. No trabalho, foram apresentados resultados de ensaios realizados com uma máquina de indução de rotor bobinado de 1 kVA, interligando a rede elétrica da concessionária local a uma máquina síncrona de mesma potência nominal (1 kVA). Os resultados obtidos comprovaram que a aplicação de torque mecânico no eixo da máquina de indução permite controlar o fluxo de potência ativa que flui entre estator e rotor, ou seja, o fluxo na interligação entre os sistemas elétricos. De fato, conforme demonstrado no trabalho, o montante de potência que atravessa o entreferro da máquina principal é proporcional à intensidade do torque aplicado; o sentido do fluxo de potência é determinado pelo sentido do torque aplicado. Estes conceitos serão aprofundados no Capítulo 2.

O primeiro VFT foi instalado e comissionado pela Hydro-Quebec, na subestação de Langlois, no ano de 2003. O equipamento foi dimensionado para transferir até 100 MW entre dois sistemas elétricos assíncronos de mesma frequência nominal (60 Hz): Quebec, no Canadá, e a rede de Nova York, nos Estados Unidos. As características básicas e o desempenho elétrico do VFT de Langlois foram apresentados em 2004 por LARSEN *et al.* [4]-[5], DOYON *et al.* [6] e DUSSEAULT *et al.* [7].

O VFT de Langlois apresenta as seguintes características principais: (i) máquina principal (transformador defasador rotativo) de 100 MW, 17 kV; (ii) máquina de corrente contínua para aplicação de torque (3750 HP), com acionamento eletrônico de velocidade variável; (iii) quatro bancos de capacitores (4 x 25 Mvar) manobráveis para compensação reativa e controle do perfil de tensão; e (iv) dois transformadores elevadores (142/17 kV) para conexão dos sistemas à máquina principal [8][9]. É importante notar que a potência da máquina de corrente contínua é de cerca de 3% da potência nominal do VFT.

Sob o ponto de vista operacional, o VFT apresenta funcionalidades similares a de sistemas *back-to-back* HVDC, pois viabiliza o controle contínuo da potência ativa transferida entre os sistemas interligados. Entretanto, consome potência reativa da rede elétrica em decorrência das correntes de magnetização do equipamento e do fenômeno de dispersão de fluxo magnético nos enrolamentos de estator e rotor. Como consequência, o VFT necessita de equipamentos adicionais para compensação reativa e controle do perfil de tensão da rede. O dimensionamento da compensação reativa necessária depende das características dos sistemas elétricos envolvidos. No caso do VFT de Langlois [8], a compensação reativa é realizada por meio de banco de capacitores manobráveis, conforme abordado no parágrafo anterior.

No que se refere às estratégias de controle, o VFT utiliza um regulador de potência em malha fechada para ajustar o fluxo de potência ativa na interligação ao valor determinado pelo operador. O equipamento fornece funcionalidades de controle adicionais que incluem a possibilidade de regulação da frequência em um dos sistemas, o suprimento de sistemas sem fonte, o amortecimento de oscilações eletromecânicas e ações de controle emergenciais para fazer frente a contingências nos sistemas [8][9].

Entre 2007 e 2008, MERKHOUF *et al.* [10][11] abordaram em maiores detalhes o projeto eletromagnético do VFT. Baseando-se em análises de elementos finitos, os trabalhos indicaram que a presença de harmônicos na corrente de magnetização e na tensão de circuito aberto do VFT é baixa (inferior a 1%), considerando o dispositivo energizado pelo estator. Com o VFT em carga, a presença de harmônicos nas formas de onda de corrente aumenta ligeiramente, sem exceder 1% do valor da componente fundamental da corrente de carga. Esta característica é apontada na literatura como um importante diferencial do VFT em relação a alternativas baseadas em conversores eletrônicos.

Em 2007, TRUMAN *et al.* [12] abordaram aspectos importantes do sistema de acionamento para aplicação e controle de torque no VFT, especialmente no que se refere à máquina de corrente contínua utilizada. Os autores ressaltam que a aplicação de torque no eixo do VFT é feita sob condições bastante particulares, pois, em geral, o rotor do VFT gira a velocidades muito baixas, podendo parar durante alguns instantes. De fato, conforme será abordado no Capítulo 2, a velocidade de rotação do VFT é proporcional ao desvio entre as frequências dos dois sistemas ( $f_1-f_2$ , na Figura 1-1). Na prática, este desvio de frequência tende a ser muito baixo em função da ação contínua do controle carga/frequência dos sistemas.

Pelo exposto anteriormente, a aplicação de torque no eixo do VFT é feita com velocidade igual ou próxima de zero durante a maior parte do tempo. Sobre este aspecto, TRUMAN *et al.* [12] ressaltam que as máquinas de corrente contínua são adequadas para aplicação e controle do torque no VFT, em face de seu bom desempenho a velocidades mais baixas ou nulas.

No VFT de Langlois, a máquina de corrente contínua para aplicação de torque apresenta as seguintes características: (i) número de polos: 20; (ii) potência nominal: 2.796 kW; (iii) tensão nominal: 750 V; (iv) velocidade nominal: 48 rpm; e (v) velocidade máxima: 93 rpm [12]. Ressalta-se que a potência nominal da máquina de corrente contínua é da ordem de 3% da potência nominal do VFT (100 MVA).

MARKEN *et al.* [13], em 2008, apresentaram a experiência obtida no processo de manutenção do VFT de Langlois em seus primeiros cinco anos de operação. Os autores concluem que manutenção do VFT é mais simples do que a que é necessária em um sistema *back-to-back* HVDC, por exemplo. O bom desempenho do VFT no

questo confiabilidade é atribuído à sua baixa velocidade de rotação e à utilização de equipamentos tradicionalmente empregados em sistemas de potência.

Além da simplicidade no processo de manutenção, a literatura indica outras vantagens do VFT em relação às tecnologias baseadas em sistemas HVDC, quais sejam: (i) a menor área ocupada por uma subestação de um VFT, quando comparada a uma subestação de um sistema HVDC de mesma potência; (ii) a menor injeção de correntes harmônicas na rede elétrica; (iii) a sua relativa estabilidade frente a distúrbios nos sistemas, incluindo curtos-circuitos; (iv) possibilidade de alimentação de sistemas sem fonte; (v) elevação dos níveis de curto-circuito em sistemas fracos; (vi) não há riscos de interações dinâmicas indesejáveis com unidades geradoras ou outros equipamentos do sistema elétrico [4][7][13].

Ainda em relação aos potenciais benefícios da utilização do VFT, em 2008, HASSINK [14] *et al.* abordaram aspectos importantes do desempenho do VFT durante distúrbios na rede elétrica. Os resultados apresentados demonstram que o VFT revela características estabilizadoras típicas de sistemas de corrente alternada convencionais, não obstante constitua uma interligação assíncrona. Durante um curto-circuito na rede, por exemplo, a resposta transitória do VFT é bastante similar àquela observada em um transformador convencional. Há injeção de potência reativa pelo VFT durante o curto-circuito, o que permite minimizar os afundamentos de tensão na rede e os consequentes impactos verificados nas cargas. Além disso, a circulação de potência ativa na interligação é restabelecida logo após a eliminação do defeito, reduzindo os efeitos transitórios nos sistemas interligados. Deve-se registrar que o VFT revela uma natural capacidade de suportar afundamentos de tensão decorrentes de curtos-circuitos na rede.

Depois do projeto de Langlois, outro VFT foi instalado no Texas, EUA, na subestação de Laredo. Em 2007, PRATICO *et al.* [15] apresentaram detalhes sobre este novo empreendimento utilizando o VFT. O equipamento foi projetado para transferir 100 MW entre os sistemas da ERCOT (Texas) e CFE (México), sistemas que operam de forma assíncrona. De acordo com os autores, o desempenho do VFT durante contingências na rede de transmissão, observado na fase dos estudos de planejamento, contribuiu para a escolha do VFT em detrimento de alternativas baseadas em sistemas *back-to-back* HVDC, convencionais e tipo VSC.

O VFT de Laredo apresenta características similares às do dispositivo de Langlois, quais sejam: (i) máquina principal (transformador defasador rotativo) de 100 MW, 17 kV; (ii) máquina de corrente contínua para aplicação de torque (3750 HP), com acionamento eletrônico de velocidade variável; (iii) quatro bancos de capacitores (25 Mvar) manobráveis para compensação reativa e para controle do perfil de tensão; e (iv) dois transformadores elevadores (142/17 kV) para conexão dos sistemas à máquina principal [15].

Conforme abordado anteriormente, os projetos de Langlois e Laredo utilizam um único VFT na conexão dos sistemas. Contudo, a conexão de VFT em paralelo não oferece grandes desafios e permite aumentar o nível de potência total da interligação. Esse é o caso do empreendimento de Linden, Nova Jersey, EUA, primeiro projeto que considera a operação de dispositivos VFT em paralelo. Nesse caso, foram instalados três VFT de 100 MW em paralelo, viabilizando transferências de até 300 MW entre Linden e a cidade de Nova York [16][17]. Outra característica do projeto de Linden é o fato da conexão ser feita entre sistemas síncronos, ou seja, há interligações em corrente alternada em paralelo ao projeto com VFT. Registre-se que os primeiros projetos de VFT, de Langlois e Laredo, conectam sistemas assíncronos.

Sobre o projeto de Linden, PRATICO *et al.* [17] afirmam que a escolha da alternativa baseada em VFT foi motivada pela capacidade de controle contínuo do fluxo de potência na interligação, pelo baixo risco de interação dinâmica do VFT com os demais elementos da rede e pelo reduzido espaço físico ocupado pelo empreendimento. No que se refere às interações dinâmicas, segundo os autores, as alternativas baseadas em sistemas HVDC analisadas ofereciam dificuldades para mitigação dos riscos da ocorrência de ressonância subsíncrona nos geradores térmicos da região.

As características principais do projeto de Linden são: (i) máquinas principais (transformadores defasadores rotativos) 3 x 100 MW, 17 kV; (ii) máquinas de corrente contínua para aplicação de torque (3 x 3750 HP), com acionamento eletrônico de velocidade variável; (iii) três bancos de capacitores (25 Mvar) manobráveis para compensação reativa e controle do perfil de tensão; e (iv) três transformadores elevadores 345/17 kV e três transformadores elevadores 230/17 kV para conexão dos sistemas às máquinas principais [17].

Em 2007, BAGEN *et al.* [18] apresentaram uma análise comparativa entre alternativas baseadas na utilização de estações conversoras *back-to-back* HVDC e VFT, para uma futura interligação de 1600 MW a ser instalada entre as províncias de Ontário e Manitoba, no Canadá. A solução com VFT considerou a operação em paralelo de dezesseis unidades de 100 MW, não obstante os autores tenham apontado para a hipótese de utilização de dispositivos de maior potência unitária (6 x 267 MW, por exemplo). Na solução com *back-to-back* HVDC foi considerada a utilização de conversores comutados pela rede (a tiristores) e a instalação de bancos de capacitores série na rede CA, em face dos reduzidos níveis de curto-circuito nas subestações de fronteira da futura interligação.

Nas análises dinâmicas, foram consideradas simulações de curtos-circuitos trifásicos em barramentos de 500 kV, eliminados em 4 ciclos [18]. Os resultados demonstraram que a resposta inicial do VFT é mais rápida que a verificada no sistema HVDC. Após 70 ms da eliminação do defeito, a potência ativa no VFT atinge 90% do valor pré-distúrbio; no *back-to-back* HVDC, este mesmo nível de potência é atingido após 190 ms. Por outro lado, a resposta da solução HVDC mostra-se mais amortecida e se acomoda mais rapidamente ao valor de potência pré-distúrbio. Nas simulações apresentadas, a potência ativa no VFT retorna ao valor pré-distúrbio 2,5 s após a eliminação do defeito. Para o caso do *back-to-back* HVDC, este tempo é de 600 ms.

Conforme já abordado anteriormente, o VFT opera a velocidades muito baixas (próximas a zero) quando da interligação de sistemas de mesma frequência nominal. Assim, a potência mecânica requerida do sistema de acionamento é baixa em regime normal, pois o produto (torque x velocidade) será baixo ou nulo para qualquer valor de torque aplicado.

Deve-se registrar ainda que quando o rotor do VFT está parado o dispositivo opera de forma similar a um transformador convencional, no qual toda potência que entra pelo estator (primário) atravessa o entreferro e sai pelo rotor (secundário), a menos das perdas. De outra forma, quando a velocidade do VFT é diferente de zero, ocorre conversão de parte da energia elétrica em energia mecânica no eixo do equipamento. Estes aspectos serão aprofundados no Capítulo 2.

Os efeitos da conexão de dois sistemas assíncronos de frequência nominal distinta (50/60 Hz) utilizando o VFT foram investigados por RASLAN *et al.* [19], em

2010. Os autores ressaltam que, nesta condição operativa, o rotor do VFT gira continuamente a uma velocidade que é proporcional à diferença de frequência verificada entre os dois sistemas que estão sendo interligados ( $60-50=10$  Hz). Como resultado, a aplicação de torque no eixo do VFT envolve níveis de potência mais elevadas. De fato, a potência mecânica a ser aplicada ou retirada do eixo do VFT pela máquina de corrente contínua é função do produto (torque  $\times$  velocidade) verificado. Neste caso, o produto (torque  $\times$  velocidade) é diferente de zero para qualquer valor de torque aplicado, ao contrário do que ocorre na interligação de sistemas de mesma frequência nominal, onde a velocidade do VFT é sempre muito próxima a zero.

Em 2011, WANG *et al.* [20] apresentaram uma proposta de utilização de um VFT para conexão de um parque eólico de 80 MW, baseado em turbinas eólicas com geradores de indução duplamente alimentados (DFIG). Resultados de simulação demonstram que a potência elétrica gerada no parque eólico pode ser transferida para rede por meio da aplicação de torque no eixo do VFT. Além disso, o trabalho concluiu que as flutuações da potência elétrica injetada na rede, que são decorrentes do comportamento aleatório do vento, poderiam ser atenuadas pelo VFT.

A hipótese de conexão de geração eólica através do VFT também foi considerada por GEETHA *et al.* em [21] e [22]. Baseando-se em resultados de simulações digitais realizadas no programa ATP, o trabalho conclui que o VFT é uma alternativa viável para o aumento do grau de penetração da energia eólica nos sistemas elétricos.

Em outro trabalho, WANG *et al.* [23] apresentaram a análise da conexão integrada de um parque eólico (80 MW, máquinas de indução de dupla alimentação) e uma usina de ondas (40 MW, máquinas de indução tipo gaiola), utilizando um VFT de 160 MW. Resultados de simulação demonstram que o VFT é capaz de estabilizar o conjunto formado pelo parque eólico e pela usina de ondas. Além disso, segundo os autores, a utilização do VFT permitiria atenuar as flutuações da potência elétrica injetada na rede, decorrentes das variações na velocidade vento.

McNABB [24] *et al.* abordaram em seu trabalho aspectos da modelagem do VFT para estudos de fluxo de potência em regime permanente, de estabilidade eletromecânica e para estudos de transitórios eletromagnéticos. Para os estudos de fluxo de potência, o modelo proposto para VFT é o de um transformador defasador

cuja defasagem angular varia na faixa de  $\pm 180^\circ$  elétricos. Para simulações de transitórios eletromecânicos foi proposta a modelagem apresentada na Figura 1-2.

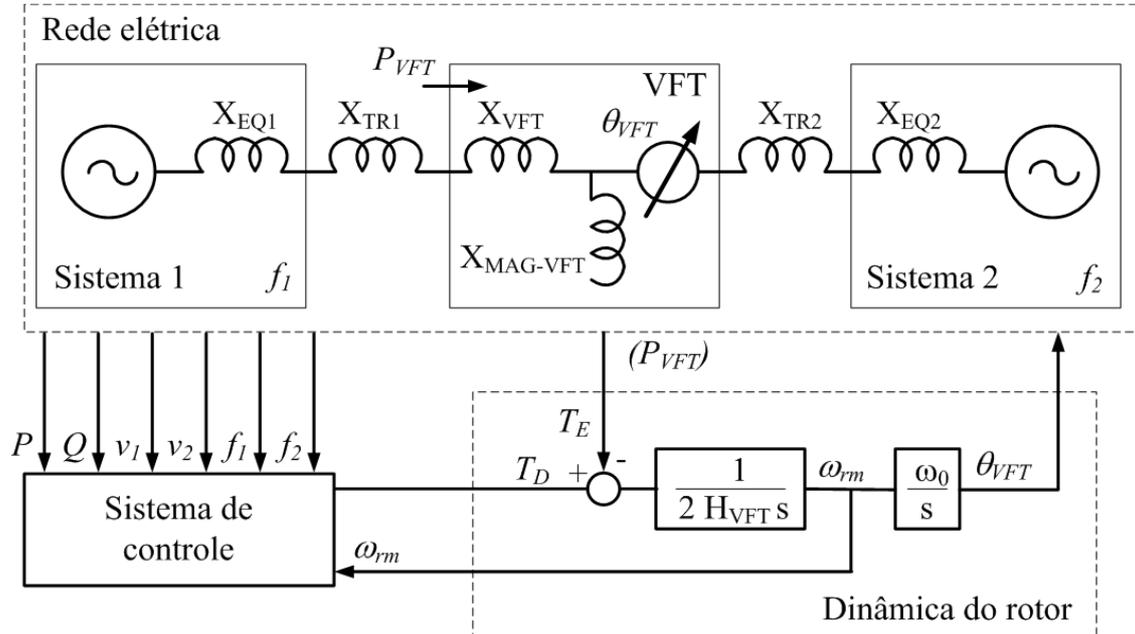


Figura 1-2: Modelo do VFT para simulação de transitórios eletromecânicos [24].

Observa-se na Figura 1-2 que o VFT é representado por um transformador defasador com defasagem angular  $\theta_{VFT}$ , reatância de dispersão  $X_{VFT}$  e reatância de magnetização  $X_{MAG-VFT}$  [24]. No modelo, o sistema de controle do VFT recebe medições das principais grandezas elétricas (potência ativa e reativa, valor eficaz das tensões e frequência elétrica) da rede e do equipamento, bem como uma realimentação da velocidade da máquina. Partindo da referência de potência na interligação e valor de potência medido, o sistema de controle determina o torque mecânico necessário  $T_D$  a ser aplicado no eixo do VFT. A dinâmica do rotor do VFT é representada pela equação de oscilação, com a representação da inércia  $H_{VFT}$  do equipamento. Como resultado determina-se a velocidade  $\omega_{rm}$  do rotor do VFT e a defasagem angular  $\theta_{VFT}$  a ser considerada no modelo de transformador defasador da rede elétrica.

Em 2010, a modelagem proposta em [24] foi implementada por VINHAES [25] no programa de transitórios eletromecânicos ANATEM, ferramenta para análise da estabilidade eletromecânica desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel). Além dessas análises, o trabalho apresentou resultados de simulações de regime permanente e de transitórios eletromagnéticos, realizadas no ANAREDE e PSCAD/EMTDC, respectivamente. As análises dinâmicas consideraram uma estrutura

de controle baseada em controlador PI com malha adicional de estabilização, para a qual o VFT apresentou bom desempenho dinâmico.

Um modelo do VFT para transitórios eletromagnéticos – desenvolvido no programa ATP – foi apresentado por CHEN *et al.* [26], em 2005. No modelo, o sistema mecânico foi modelado através de equivalente elétrico. O trabalho apresentou resultados de simulações para diversos eventos, tais como a energização e sincronização do VFT aos sistemas, aplicação de rampas e degraus na referência de potência e curtos-circuitos na rede.

Em 2009, YUAN *et al.* [27] apresentaram outro modelo para transitórios eletromagnéticos, agora desenvolvido na ferramenta PSCAD/EMTDC. O modelo desenvolvido considera a representação da máquina principal do VFT, através de máquina de indução de rotor bobinado, do sistema de acionamento e máquina auxiliar de corrente contínua e do sistema de controle do dispositivo. Nas simulações de contingências apresentadas fica evidente o desempenho dinâmico superior da alternativa com VFT quando comparada a alternativas em corrente alternada convencionais de mesma potência.

Um modelo para o VFT desenvolvido em ambiente MATLAB/SIMULINK foi apresentado por EL DIN *et al.* [28] em 2011. Os resultados obtidos demonstram que o modelo proposto representa satisfatoriamente o comportamento dinâmico do VFT, quando submetido a diferentes tipos de contingências. Alguns resultados de simulação foram validados através de ensaios em escala laboratorial.

## **1.2 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA**

A hipótese de utilização do VFT no Sistema Interligado Nacional (SIN) ainda não foi considerada nos estudos de planejamento da expansão do sistema elétrico. Para que isto seja possível, é necessário dispor de modelos que reproduzam o desempenho do VFT em condições normais de operação e quando da ocorrência de contingências na rede elétrica.

Deve-se registrar que as definições que emanam dos estudos de planejamento da expansão do SIN, no que se refere às alternativas de transmissão a serem implementadas, estão fortemente associadas aos resultados dos estudos de transitórios eletromecânicos. De fato, os aspectos dinâmicos têm grande relevância no SIN em

função das características do sistema de transmissão e geração no Brasil, com linhas longas e geração distante dos centros de maior consumo.

A ferramenta oficial para simulação digital de transitórios eletromecânicos no SIN é o ANATEM. Esse programa é empregado pelas empresas do setor elétrico brasileiro, especialmente pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), nos estudos de planejamento da expansão e programação da operação.

O modelo do VFT apresentado em [24] (ver Figura 1-2) pode ser implementado no ANATEM sem grandes dificuldades, conforme abordado na seção anterior. Contudo, devem ser consideradas algumas limitações desse modelo, sobretudo para a análise de aplicações no SIN. De fato, a modelagem proposta baseia-se na representação do VFT por um modelo de transformador defasador, que considera que os sistemas elétricos formam um único sistema síncrono. Deste tipo de representação decorrem as seguintes limitações principais, a saber:

- i. A análise da estabilidade do VFT durante contingências que resultem em grandes desvios de frequência (maiores que 1 Hz, por exemplo) fica comprometida, em face das aproximações realizadas. De fato, conforme será abordado no Capítulo 2, o desvio de frequência entre os sistemas é determinante para o movimento do rotor do VFT. E quando o rotor gira, parte da energia elétrica é convertida em energia mecânica no eixo. Nesse caso, a potência elétrica que entra no estator não é mais igual à potência elétrica que sai pelo rotor. Esse comportamento não é adequadamente reproduzido com o modelo de transformador defasador, o que compromete o balanço de potência;
- ii. É inviável a simulação de contingências que resultem em grandes desvios de frequência entre os sistemas (maiores que 1 Hz, por exemplo). É o caso, por exemplo, da abertura das interligações síncronas entre áreas do sistema elétrico, condição analisada no planejamento e programação da operação e no processo de análise de perturbações. Neste tipo de contingência, há interesse em analisar o desempenho das interligações assíncronas remanescentes, em particular do VFT;

- iii. É inviável a simulação de interligações entre sistemas elétricos de frequência nominal distinta. Este problema é especialmente importante no SIN, em função das potenciais interligações entre o Brasil, cujo sistema elétrico opera a 60 Hz, e alguns países da América do Sul nos quais os sistemas elétricos operam a 50 Hz.

Além da questão da estrutura do modelo para simulação abordado anteriormente, o aprofundamento de aspectos do controle do VFT também é fundamental para que o dispositivo possa ser considerado como uma alternativa para aplicação no SIN. Ressalta-se que o desempenho dinâmico do VFT e, por consequência, dos sistemas interligados, depende fortemente das estratégias de controle utilizadas.

### **1.3 OBJETIVO DA TESE**

O objetivo desta tese foi o de analisar a viabilidade da aplicação do VFT no Sistema Interligado Nacional (SIN), tendo como foco o desempenho dinâmico do VFT e do sistema elétrico brasileiro. Foram apresentados resultados para duas aplicações com estações VFT, como alternativas para a conexão das usinas de Santo Antônio e Jirau ao Sistema Acre/Rondônia.

Para viabilizar a representação do VFT nas simulações de transitórios eletromecânicos no ANATEM, foi necessário desenvolver um novo modelo para o equipamento, baseado nas equações da máquina rotativa nos eixos  $dq$  e implementado através de fontes de corrente controladas. Para o sistema de controle do VFT, foram determinados a estrutura e os ajustes correspondentes através do desenvolvimento de modelos linearizados da rede elétrica e do VFT.

### **1.4 DESENVOLVIMENTO DA TESE**

O Capítulo 2 desta tese revisa os aspectos fundamentais da interligação de sistemas elétricos de potência, considerando as diferentes tecnologias disponíveis, incluindo o VFT. Para esse dispositivo, são apresentadas as equações básicas que regem seu funcionamento quando da conexão de sistemas elétricos síncronos ou assíncronos. As relações entre as grandezas elétricas e mecânicas no VFT são demonstradas através do modelo matemático desenvolvido, utilizando uma nova abordagem que facilita o entendimento do funcionamento do equipamento.

No Capítulo 3 apresenta-se o modelo digital do VFT para simulação no programa de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC. São apresentadas as principais características do modelo digital, incluindo o sistema de controle, o circuito de sincronismo e os sistemas equivalentes. O modelo digital inclui a representação do sistema de acionamento associado à máquina de corrente contínua e agrega inovações em relação aos modelos digitais disponíveis na literatura.

O Capítulo 4 apresenta os aspectos fundamentais do controle do fluxo de potência ativa em interligações com o VFT. Foram realizadas análises com o modelo linearizado do VFT e da rede elétrica, a partir das quais ficam evidentes importantes aspectos do comportamento dinâmico do dispositivo. Como conclusão, foram propostos a estrutura e faixas de ajustes para um controlador para o VFT, cujo desempenho foi validado por meio de simulações digitais no PSCAD/EMTDC.

No Capítulo 5, apresenta-se um novo modelo do VFT para simulação de transitórios eletromecânicos em sistemas de potência, implementado no ANATEM. Apresenta-se a estrutura geral do modelo, suas interfaces com a rede elétrica e as estratégias utilizadas para sua implementação através do recurso de fontes de corrente controladas no programa ANATEM. Foram apresentados resultados de simulação que permitem aferir o funcionamento do modelo digital desenvolvido.

O Capítulo 6 apresenta a análise de configurações do SIN para as quais o VFT foi utilizado para a conexão de sistemas elétricos assíncronos de mesma frequência nominal. Apresentam-se resultados para duas configurações distintas, tendo como foco alternativas para a conexão das usinas de Santo Antônio e Jirau ao SIN. Em todos os casos, a conexão das usinas com o Sistema Acre/Rondônia é realizada por meio de estações utilizando VFT. Os resultados foram obtidos com o programa ANATEM, considerando os modelos desenvolvidos nesta tese para o VFT e os modelos dos demais equipamentos do SIN, estes últimos disponíveis na base de dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Por fim, as constatações finais, contribuições da tese e as sugestões para trabalhos futuros estão apresentadas no Capítulo 7.

## **2 A INTERLIGAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS COM O TRANSFORMADOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL**

Este capítulo apresenta os aspectos fundamentais da interligação de sistemas elétricos de grande porte, incluindo as tecnologias atualmente disponíveis para a efetivação das interligações. Em particular, por ser objeto dessa tese, apresenta-se em maior detalhe o funcionamento do Transformador de Frequência Variável (VFT), dispositivo que pode ser empregado na interligação de sistemas elétricos síncronos ou assíncronos.

Como contribuição, as relações entre as grandezas elétricas e mecânicas no VFT são demonstradas através do modelo matemático do equipamento, utilizando uma abordagem que facilita o entendimento do funcionamento do equipamento.

### **2.1 A INTERLIGAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS**

Com o crescimento da demanda por energia elétrica, ficaram evidentes os benefícios de interligar os sistemas elétricos que antes operavam isolados. Por um lado, a conexão de um ou mais sistemas elétricos conduz ao aumento da segurança elétrica global. De fato, um distúrbio em um sistema elétrico de maior porte tende a provocar impactos relativamente menores quando comparados com aqueles verificados em um sistema de menor capacidade instalada. É o caso, por exemplo, das variações de frequência que resultam do desligamento intempestivo de unidades geradoras; tais variações tendem a ser menores em sistemas de maior capacidade instalada.

A despeito do aumento da segurança elétrica que as interligações ensejam, são os ganhos de natureza energética que, em geral, justificam os investimentos necessários para a construção e operação das mesmas. As interligações permitem aproveitar a diversidade existente entre os sistemas elétricos conectados, no que se refere aos custos de produção da energia elétrica em cada sistema, a aspectos ambientais específicos, à sazonalidade das cargas e das fontes primárias de energia. Este aspecto fica bastante evidente em sistemas com predominância da geração de origem hidráulica. Nestes sistemas, pode haver diversidade significativa de afluências que permita e recomende a transferência de excedentes energéticos de um sistema para outro. Esta estratégia permite minimizar os efeitos de uma eventual escassez de água

nos reservatórios de regiões que atravessam períodos secos e permite evitar, ou reduzir, os vertimentos em sistemas que atravessam períodos de abundância de chuvas.

Na prática, as tecnologias disponíveis permitem constituir interligações em corrente alternada ou em corrente contínua. Também são viáveis interligações em corrente alternada que utilizam máquinas rotativas, como é o caso do VFT. As próximas seções apresentam os principais aspectos relacionados a estas alternativas para conexão de sistemas elétricos, tendo como foco o VFT.

### **2.1.1 INTERLIGAÇÕES EM CORRENTE ALTERNADA**

As primeiras interligações entre sistemas elétricos foram feitas utilizando circuitos em corrente alternada. Este tipo de conexão caracteriza-se pela formação de um novo sistema elétrico no qual as máquinas síncronas de ambos os sistemas operam, necessariamente, em sincronismo. De fato, a conexão elétrica em corrente alternada dá origem a torques que agem no sentido de manter em sincronismo os rotores das máquinas síncronas dos sistemas interligados [29]. Pode-se dizer que a interligação em corrente alternada é uma interligação síncrona; só é possível mantê-la em operação, transferindo energia de forma estável entre os sistemas, se as máquinas síncronas dos sistemas interligados permanecem a uma mesma frequência, denominada frequência síncrona.

Contingências nos sistemas elétricos interligados – tais como curtos-circuitos e aberturas de linhas de transmissão – podem levar suas unidades geradoras à perda de sincronismo. Nestes casos, uma vez caracterizada a perda de sincronismo, faz-se necessária a rápida abertura da interligação, sob pena de submeter os sistemas a grandes excursões de tensão e corrente, com consequências indesejáveis para as concessionárias e consumidores de energia elétrica.

As interligações em corrente alternada agregam modos de oscilação eletromecânica que resultam da interação entre as máquinas síncronas dos sistemas conectados. Dependendo das características dos sistemas e da própria interligação podem ser verificadas oscilações eletromecânicas de baixa frequência e baixo amortecimento. Em algumas situações, o ajuste adequado dos estabilizadores de sistemas de potência (PSS) das unidades geradoras não é suficiente para amortecer adequadamente as oscilações verificadas. Nestes casos, torna-se necessária a instalação

de equipamentos para introdução de amortecimento suplementar no sistema, como é o caso dos equipamentos FACTS (TCSC, por exemplo).

As interligações em corrente alternada só podem ser aplicadas na conexão de sistemas de mesma frequência nominal. Esta característica constitui uma limitação para aplicação das interligações em corrente alternada, tendo em vista que há no mundo diversos casos de sistemas elétricos limítrofes que apresentam frequências nominais distintas (60 e 50 Hz, por exemplo).

Nas interligações síncronas o intercâmbio pré-definido através de estudos específicos é efetivado em tempo real através do despacho adequado das unidades geradoras dos dois sistemas. Esta estratégia está ilustrada na Figura 2-1, que apresenta duas condições de intercâmbio distintas: (a) intercâmbio de 500 MW do sistema 1 para o sistema 2; e (b) intercâmbio de 200 MW do sistema 2 para o sistema 1. Na figura, a letra G indica a geração total do sistema e a letra D indica a demanda total, incluindo as cargas e as perdas de cada sistema. Em função da presença de um transformador na interligação, podem ser diferentes as tensões  $v_1$  e  $v_2$  verificadas nas fronteiras dos sistemas 1 e 2. Contudo, a frequência nominal dos dois sistemas interligados deve ser necessariamente igual para que os intercâmbios de energia possam ser efetivados de forma estável.

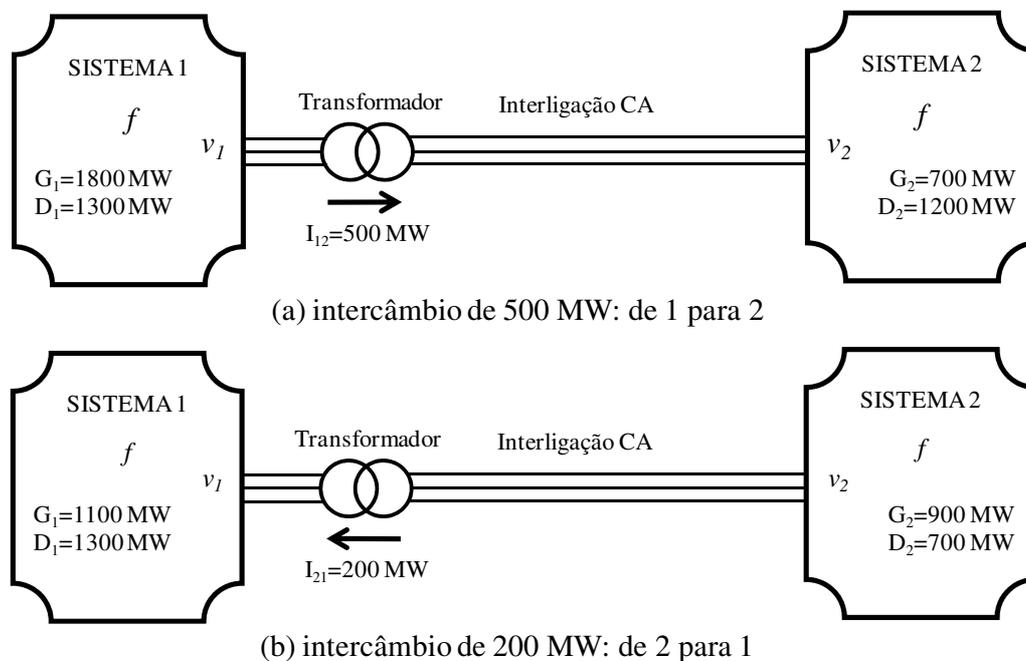


Figura 2-1: Intercâmbio entre sistemas elétricos conectados de forma síncrona.

Em sistemas elétricos de grande porte, o ajuste contínuo dos intercâmbios nas interligações em corrente alternada é realizado pelo CAG. Este tipo de controle ajusta continuamente a geração de usinas previamente selecionadas (unidades geradoras sob ação do CAG), visando o controle de frequência e/ou dos intercâmbios entre as áreas. Ou seja, nas interligações em corrente alternada o ajuste dos intercâmbios é realizado de forma indireta e, como consequência, lenta.

O ajuste do fluxo de potência ativa em interligações em corrente alternada afeta o perfil de tensão da própria interligação. Da mesma forma, variam os níveis de tensão dos barramentos que se encontram eletricamente mais próximos à fronteira da interligação. O grau de influência do carregamento da interligação no perfil de tensão depende, principalmente, do nível de curto-circuito dos barramentos de fronteira e das características elétricas da própria interligação (nível de tensão, impedâncias, compensação em derivação, grau de compensação série). Na prática, o controle do perfil de tensão em interligações em corrente alternada é realizado através da manobra de reatores e bancos de capacitores em derivação, através do controle da excitação de compensadores síncronos e unidades geradoras, utilização de compensadores estáticos de reativos, etc.

Por fim, deve-se ressaltar que as interligações em corrente alternada, por suas características inerentes, não introduzem correntes harmônicas no sistema em níveis significativos.

### **2.1.2 INTERLIGAÇÕES EM CORRENTE CONTÍNUA**

O advento das chaves semicondutoras de potência permitiu desenvolver conversores eletrônicos compatíveis com níveis de potência típicos de sistemas elétricos de grande porte. A partir destes conversores tornou-se viável a implantação de sistemas HVDC, destinados à transmissão de energia elétrica entre sistemas utilizando a corrente contínua [30][31].

Um aspecto marcante da transmissão em corrente contínua é que as máquinas síncronas dos sistemas conectados não operam, de fato, em sincronismo. A operação dos elos de corrente contínua independe das diferenças de frequência existentes entre os dois sistemas interligados [30][31]. Pode-se dizer que as interligações em corrente contínua são interligações assíncronas, pois as variações de frequência em um dos sistemas não produzem efeitos diretos no desempenho das máquinas síncronas do

sistema a ele conectado. Como resultado, as interligações em corrente contínua permitem conectar sistemas de frequência nominal distinta. Esta característica dos elos de corrente contínua constitui um diferencial importante em relação às interligações em corrente alternada.

Nos elos de corrente contínua o intercâmbio pré-definido é efetivado através do ajuste do ângulo de disparo das chaves semicondutoras que integram os conversores eletrônicos. Ou seja, os intercâmbios em interligações em corrente contínua não dependem, a priori, do despacho das unidades geradoras dos sistemas envolvidos. De fato, o elo de corrente contínua é visto como uma carga constante para o sistema exportador de energia; para o sistema importador, o fluxo de potência do elo é visto como uma geração líquida injetada na rede. Na prática, o ajuste dos intercâmbios em sistemas de corrente contínua é realizado de forma direta, podendo ser realizado de forma muito mais rápida que no caso das interligações em corrente alternada.

As características dos conversores eletrônicos permitem variar rapidamente (em centenas de milissegundos) o intercâmbio nos elos de corrente contínua. Contudo, em geral, variações abruptas do intercâmbio entre sistemas elétricos não são necessárias e, na maioria das vezes, são indesejáveis. Na prática, as mudanças no intercâmbio em uma interligação em corrente contínua são realizadas de forma coordenada com alterações nos despachos de unidades geradoras dos sistemas, ação que pode demandar dezenas de minutos.

Os primeiros sistemas de transmissão HVDC foram fabricados com válvulas de mercúrio, na primeira metade da década de 50 [30]. A partir de 1975, os sistemas passaram a utilizar chaves semicondutoras de potência, o tiristor. Os conversores eletrônicos a tiristores (tipo fonte de corrente) são comutados pela rede, ou seja, dependem da tensão da rede CA para sua comutação (condução e bloqueio). Como a ação de controle neste tipo de conversor sempre é no sentido de atrasar a forma de onda da corrente em relação à forma de onda da tensão, os conversores a tiristores operam sempre absorvendo potência reativa da rede CA.

Nos conversores fonte de tensão (VSC), baseados em chaves autocomutadas como o IGBT, tanto o disparo quanto o bloqueio podem ser controlados de forma independente da tensão da rede CA. A utilização de conversores tipo VSC em interligações em corrente contínua agrega benefícios importantes para o desempenho

dos sistemas elétricos. O principal é, sem dúvida, a capacidade dos conversores de controlar a potência reativa trocada com os sistemas elétricos. Desta forma, podem ser controladas as tensões nos barramentos que se conectam as estações conversoras dos sistemas HVDC-VSC [31][32][33].

### **2.1.3 INTERLIGAÇÕES UTILIZANDO MÁQUINAS ROTATIVAS**

A aplicação mais antiga de máquinas rotativas na interligação de sistemas elétricos é o Conversor Rotativo de Frequência. Este equipamento viabilizou a conexão de sistemas de frequência nominal distinta antes mesmo do advento dos sistemas HVDC.

O Conversor Rotativo de Frequência é composto por duas máquinas síncronas, conectadas mecanicamente através de seus eixos. Os sistemas elétricos que se deseja interligar são conectados aos estatores das máquinas, através de seus enrolamentos trifásicos. Como resultado, a interligação formada é do tipo síncrona.

Para que as máquinas possam ser conectadas mecanicamente, o número de polos deve ser ajustado de forma a obter a mesma velocidade de rotação no eixo das máquinas síncronas conectadas. Para uma conexão entre sistemas elétricos de 60 e 50 Hz, por exemplo, a relação entre o número de polos das duas máquinas síncronas deve ser de 60/50, ou ainda, 6/5. Considerando que o número de polos deve ser par, uma possibilidade seria utilizar máquinas síncronas de 12 e 10 polos. No exemplo, uma máquina síncrona de 12 polos conectada ao sistema de 60 Hz apresentaria velocidade nominal de 600 rpm. No sistema de 50 Hz, a conexão de uma máquina síncrona de 10 polos resultaria na mesma velocidade nominal (600 rpm).

No Conversor Rotativo de Frequência o controle do fluxo de potência é realizado indiretamente, através do despacho das unidades geradoras dos sistemas interligados, da mesma forma que em um sistema CA convencional. Ou seja, o dispositivo não dispõe de meios próprios para controle do fluxo de potência ativa na interligação, o que é uma limitação importante.

Com o advento dos sistemas HVDC e em função das limitações inerentes ao equipamento, o Conversor Rotativo de Frequência não é mais utilizado em sistemas de potência.

O VFT é o exemplo mais recente de utilização de máquinas rotativas para a interligação de sistemas elétricos, neste caso de forma assíncrona. Por ser objeto deste trabalho, suas características principais serão apresentadas em maior detalhe nas próximas seções.

## **2.2 MODELO MATEMÁTICO DO TRANSFORMADOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL**

O Transformador de Frequência Variável, ou VFT (do inglês *Variable Frequency Transformer*), é um dispositivo que permite transferir energia entre sistemas elétricos, podendo estabelecer fluxo de potência ativa em ambos os sentidos e de forma controlada. Neste sentido, o dispositivo apresenta funcionalidades similares a de um sistema *back-to-back* HVDC.

O componente principal do VFT é a Máquina de Indução de Dupla Alimentação (MIDA), ou seja, uma máquina elétrica com enrolamentos trifásicos no estator e no rotor. Nos terminais dos enrolamentos de estator e rotor da MIDA conectam-se, através de transformadores elevadores, os sistemas elétricos entre os quais se pretende estabelecer o fluxo de energia.

O VFT permite constituir interligações síncronas, conectando dois pontos de um mesmo sistema elétrico (síncrono), ou interligações assíncronas, quando a conexão é feita entre pontos de sistemas elétricos distintos (sem outra conexão síncrona). A Figura 2-2 ilustra as duas alternativas para interligação de sistemas elétricos com a MIDA (VFT).

Ressalta-se que em uma interligação assíncrona as frequências  $f_1$  e  $f_2$  dos sistemas podem ser diferentes em regime permanente, ainda que a frequência nominal dos sistemas seja igual. Isto não ocorre na interligação síncrona, na qual as frequências dos sistemas são iguais em regime permanente e a defasagem angular entre seus terminais é menor que 90 graus elétricos (em geral, poucos graus). É importante ressaltar que no exemplo da interligação síncrona da Figura 2-2.b, o sincronismo entre os sistemas não depende do VFT e sim da interligação CA que existe em paralelo.

Além da MIDA, o VFT precisa de um componente auxiliar para controle do fluxo de potência na interligação entre os sistemas. Conforme será abordado na próxima seção, a aplicação de torque mecânico no eixo da MIDA é o que, de fato, viabiliza o controle da potência ativa na interligação. Assim, o VFT pode ser entendido

como a integração de uma MIDA com uma máquina auxiliar para aplicação de torque, acopladas mecanicamente através de seus eixos.

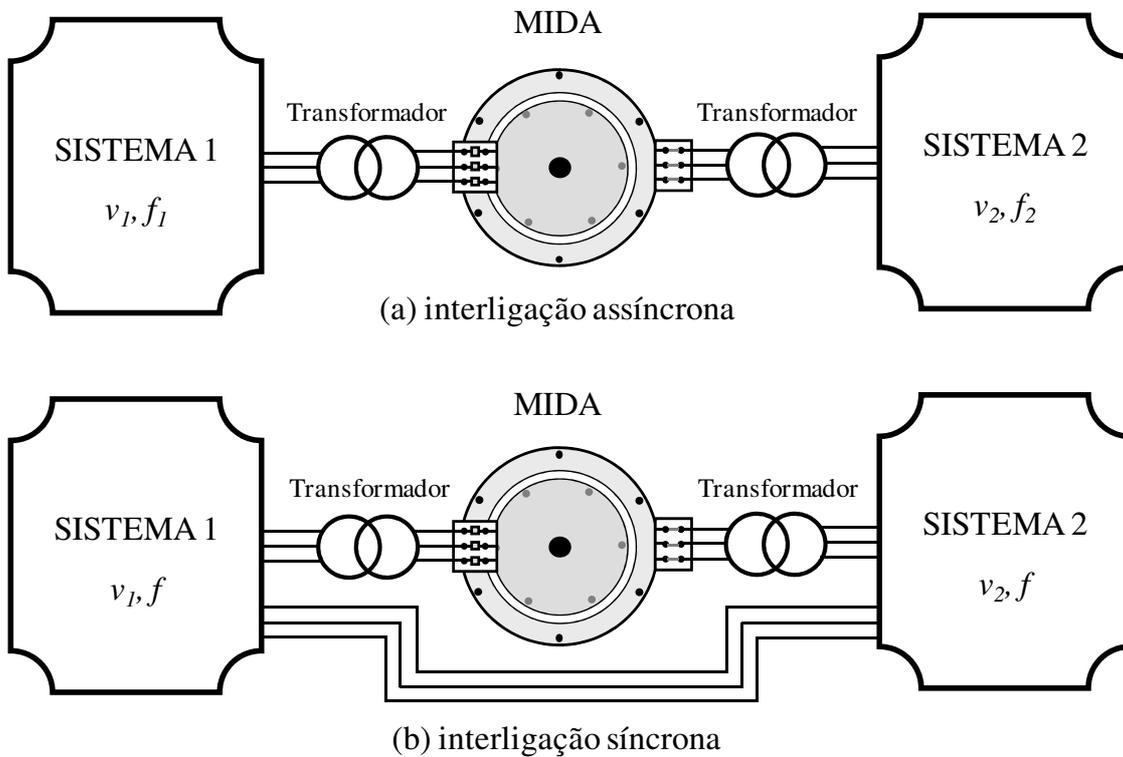


Figura 2-2: Interligações possíveis com a MIDA (VFT): (a) assíncrona; (b) síncrona.

A Figura 2-3 apresenta o diagrama esquemático de um VFT típico, com destaque para os seus principais elementos (MIDA, transformadores elevadores, máquina de corrente contínua e sistema de acionamento para aplicação e controle do torque).

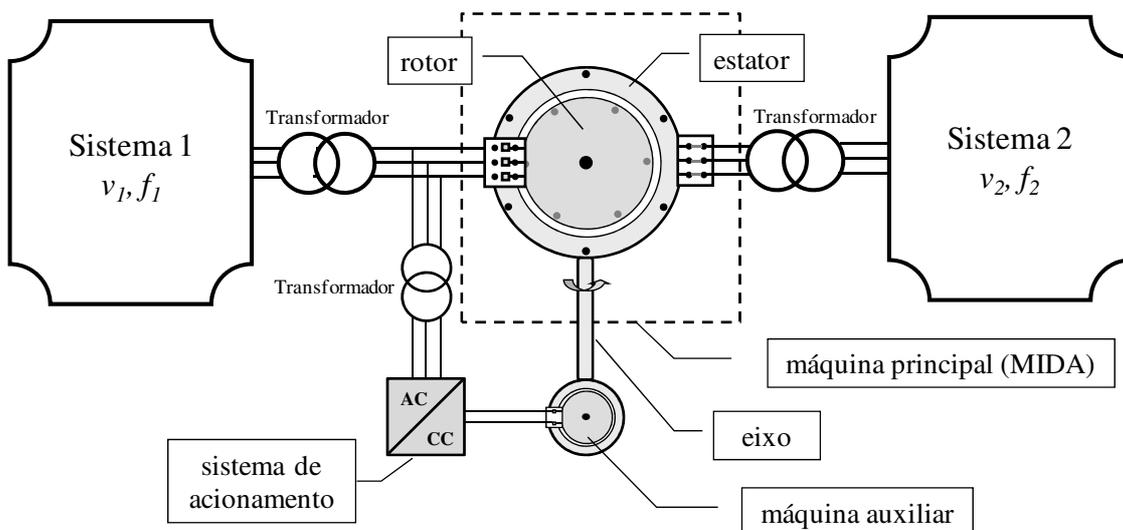


Figura 2-3: Diagrama esquemático do VFT.

A função da MIDA é a de viabilizar a conexão assíncrona de sistemas elétricos, sistemas que podem ser originalmente síncronos ou assíncronos. A função da máquina auxiliar é a de aplicar torque no eixo da MIDA para modificar a defasagem angular entre os campos do estator e do rotor e, como consequência, ajustar o fluxo de potência ativa que flui pela interligação. O controle do torque produzido pela máquina auxiliar é realizado por um sistema de acionamento eletrônico.

A Figura 2-4 apresenta um diagrama esquemático da MIDA, na qual estão representados os terminais ( $a_s, b_s, c_s$ ) e ( $a_r, b_r, c_r$ ) que derivam dos enrolamentos trifásicos do estator e do rotor, respectivamente. Os terminais do rotor encontram-se conectados aos seus enrolamentos por escovas, uma vez que o rotor pode mover-se em relação ao estator.

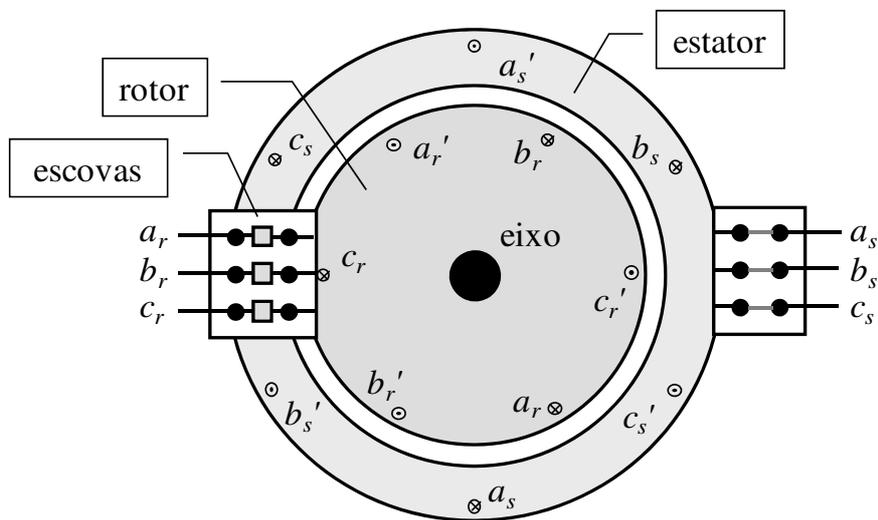


Figura 2-4: Diagrama esquemático de uma Máquina de Indução de Dupla Alimentação.

### 2.2.1 EQUAÇÕES DE TENSÃO NA MIDA EM COORDENADAS $abc$

A Figura 2-5 apresenta, de forma esquemática, os enrolamentos trifásicos no rotor e estator de uma MIDA de dois polos, considerando a ligação dos enrolamentos em estrela [34]. Considera-se que os enrolamentos do estator são idênticos ( $N_s$  espiras e resistência  $r_s$ ), distribuídos de forma perfeitamente senoidal e dispostos no espaço com defasagem angular de  $120^\circ$ . Da mesma forma, para o rotor considera-se que seus enrolamentos são idênticos ( $N_r$  espiras e resistência  $r_r$ ), distribuídos de forma perfeitamente senoidal e dispostos no espaço com defasagem angular de  $120^\circ$ . Na figura,  $\omega_r$  e  $\theta_r$  representam a velocidade e o deslocamento angular do rotor, respectivamente.

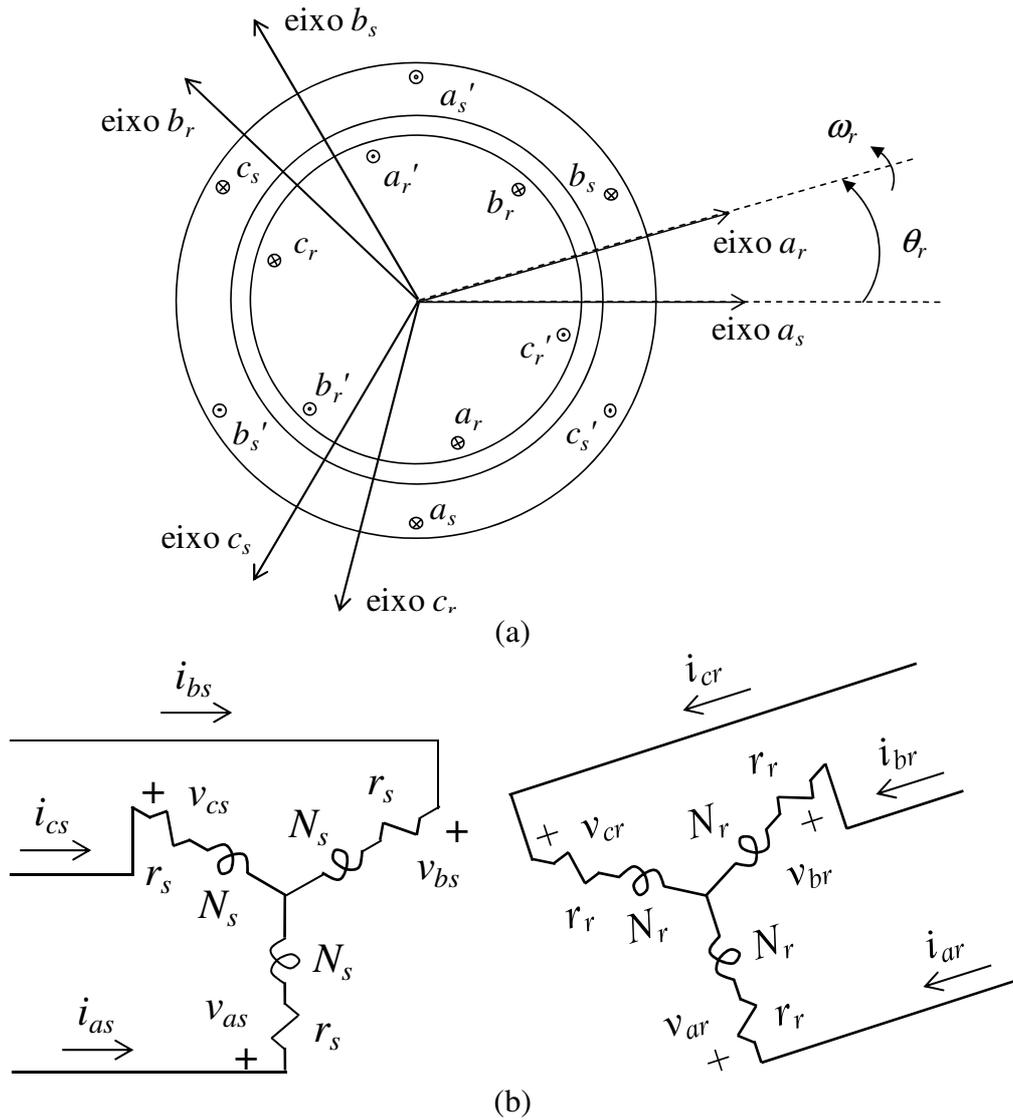


Figura 2-5: (a) Posição relativa dos enrolamentos do estator e do rotor; (b) representação esquemática com indicação das grandezas elétricas [34].

Partindo do diagrama apresentado na Figura 2-5, podem ser obtidas as equações de tensão nos enrolamentos do estator e rotor da máquina, apresentadas a seguir [34]:

$$\mathbf{v}_{abcs} = \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{abcs} + p \boldsymbol{\lambda}_{abcs}, \tag{1}$$

$$\mathbf{v}_{abcr} = \mathbf{r}_r \mathbf{i}_{abcr} + p \boldsymbol{\lambda}_{abcr}, \tag{2}$$

onde:

$$(\mathbf{f}_{abcs})^T = [f_{as} \ f_{bs} \ f_{cs}], \tag{3}$$

$$(\mathbf{f}_{abcr})^T = [f_{ar} \ f_{br} \ f_{cr}], \tag{4}$$

e os subscritos s e r indicam variáveis e parâmetros dos circuitos do estator e rotor, respectivamente; o operador  $p$  representa  $d/dt$ .

Considerando que os circuitos magnéticos são lineares, os enlaces de fluxo no estator e rotor podem ser expressos da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}_{sr} \\ (\mathbf{L}_{sr})^T & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abcs} \\ \mathbf{i}_{abcr} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

onde:

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{L}_{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r & \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Em (6),  $L_{ls}$  e  $L_{ms}$  são as indutâncias de dispersão e magnetização dos enrolamentos do estator, respectivamente. Em (7),  $L_{lr}$  e  $L_{mr}$  são as indutâncias de dispersão e magnetização dos enrolamentos do rotor, respectivamente. Em (8),  $L_{sr}$  é a amplitude da indutância mútua entre os enrolamentos do rotor e estator.

Utilizando as relações a seguir, é possível referir todas as variáveis do rotor para os enrolamentos de estator:

$$\mathbf{i}'_{abcr} = \frac{N_r}{N_s} \mathbf{i}_{abcr}, \quad (9)$$

$$\mathbf{v}'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} \mathbf{v}_{abcr}, \quad (10)$$

$$\lambda'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{abcr}. \quad (11)$$

As equações que relacionam tensão e corrente, considerando todas as variáveis referidas para os enrolamentos do estator são:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{abcs} \\ \mathbf{v}'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_s + p\mathbf{L}_s & p\mathbf{L}'_{sr} \\ p(\mathbf{L}'_{sr})^T & \mathbf{r}'_r + p\mathbf{L}'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abcs} \\ \mathbf{i}'_{abcr} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

onde:

$$\mathbf{r}'_r = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 \mathbf{r}_r, \quad (13)$$

$$L'_{lr} = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 L_{lr}, \quad (14)$$

$$\mathbf{L}'_r = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 \mathbf{L}_r, \quad (15)$$

$$\mathbf{L}'_{sr} = \frac{N_s}{N_r} \mathbf{L}_{sr}. \quad (16)$$

### 2.2.2 EQUAÇÕES DE TORQUE NA MIDA EM COORDENADAS *abc*

O torque eletromagnético na MIDA é o resultado da interação de dois campos eletromagnéticos, produzidos pelas correntes que circulam nos enrolamentos do rotor e estator. A parcela da energia  $W_f$  que é armazenada nos campos que interagem na máquina pode ser expressa da seguinte forma [34]:

$$\begin{aligned} W_f = & \frac{1}{2} (\mathbf{i}_{abcs})^T (\mathbf{L}_s - L_{ls}\mathbf{I}) \mathbf{i}_{abcs} + (\mathbf{i}_{abcs})^T \mathbf{L}'_{sr} \mathbf{i}'_{abcr} \\ & + \frac{1}{2} (\mathbf{i}'_{abcr})^T (\mathbf{L}'_r - L'_{lr}\mathbf{I}) \mathbf{i}'_{abcr}. \end{aligned} \quad (17)$$

Em (17), a matriz identidade é representada por  $\mathbf{I}$  e a energia associada à dispersão nos enrolamentos de rotor e estator é eliminada. De fato,  $W_f$  representa a energia que é armazenada no campo eletromagnético comum, ou seja, o campo que resulta da interação entre os campos produzidos pelos enrolamentos do rotor e estator e capaz de produzir torque.

O torque eletromagnético pode ser determinado através da expressão abaixo, que relaciona o torque  $T_e$  à coenergia  $W_c$ , considerando uma máquina de  $P$  polos:

$$T_e(i_j, \theta_r) = \left(\frac{P}{2}\right) \frac{\partial W_c(i_j, \theta_r)}{\partial \theta_r}. \quad (18)$$

Ressalta-se que a coenergia  $W_c$  é igual à energia  $W_f$  quando se consideram circuitos magnéticos lineares. Assim, substituindo (17) em (18), para  $W_c=W_f$ , e considerando que as indutâncias  $\mathbf{L}_s$  e  $\mathbf{L}_r'$  não são função do ângulo  $\theta_r$ , obtém-se para o torque eletromagnético na MIDA:

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right) (\mathbf{i}_{abc s})^T \frac{\partial (\mathbf{L}'_{sr})}{\partial \theta_r} \mathbf{i}'_{abc r}. \quad (19)$$

Considerando as relações (8) e (16), (19) assume a forma expandida:

$$\begin{aligned} T_e = -\left(\frac{P}{2}\right) L_{ms} \left\{ \left[ i_{as} \left( i'_{ar} - \frac{1}{2} i'_{br} - \frac{1}{2} i'_{cr} \right) + i_{bs} \left( i'_{br} - \frac{1}{2} i'_{ar} - \frac{1}{2} i'_{cr} \right) \right. \right. \\ \left. \left. + i_{cs} \left( i'_{cr} - \frac{1}{2} i'_{br} - \frac{1}{2} i'_{ar} \right) \right] \sin \theta_r \right. \\ \left. + \frac{\sqrt{3}}{2} [i_{as}(i'_{br} - i'_{cr}) + i_{bs}(i'_{cr} - i'_{ar}) + i_{cs}(i'_{ar} - i'_{br})] \cos \theta_r \right\}. \end{aligned} \quad (20)$$

### 2.2.3 EQUAÇÕES DE TENSÃO NA MIDA PARA REFERENCIAL $dq0$ GENÉRICO

Esta seção apresenta as equações de tensão na MIDA referidas a um referencial girante arbitrário, no qual as indutâncias da máquina não dependem da posição relativa do rotor. O objetivo é dispor de um modelo matemático mais simples que permita entender mais facilmente o funcionamento do VFT.

A transformação das variáveis  $abc$  do estator para o referencial girante  $dq0$  é dada por:

$$\mathbf{f}_{qd0s} = \mathbf{K}_s \mathbf{f}_{abc s}, \quad (21)$$

onde:

$$(\mathbf{f}_{qd0s})^T = [f_{qs} \ f_{ds} \ f_{0s}], \quad (22)$$

$$(\mathbf{f}_{abc s})^T = [f_{as} \ f_{bs} \ f_{cs}]. \quad (23)$$

Em (21),  $\mathbf{K}_s$  é dado por:

$$\mathbf{K}_s = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \theta & \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}, \quad (24)$$

onde  $\theta$  e  $\omega$  constituem o deslocamento angular e a velocidade do referencial girante considerado, relacionando-se da seguinte forma:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}. \quad (25)$$

A Figura 2-5 apresenta um diagrama com indicação dos eixos dos enrolamentos da máquina e do referencial girante considerado.

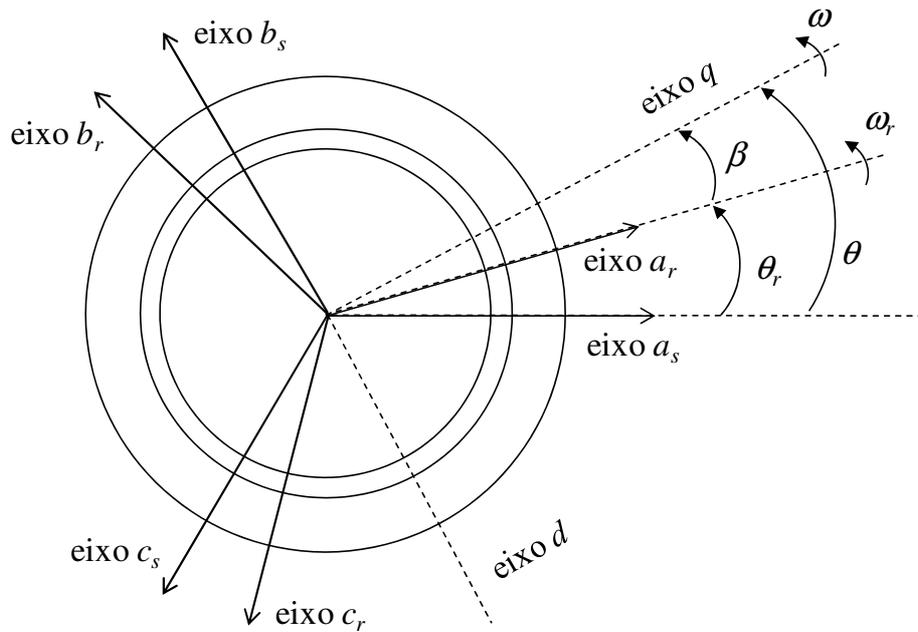


Figura 2-6: Representação esquemática da transformação de coordenadas  $abc-dq0$ , considerando um referencial girante arbitrário [34].

Na Figura 2-5,  $\theta$  é o deslocamento angular entre os eixos do referencial girante e do enrolamento do estator, tendo como referência a fase a. O deslocamento angular  $\beta$  é medido entre os eixos do referencial girante e do enrolamento do rotor, fase a. Os ângulos  $\theta$ ,  $\beta$  e  $\theta_r$  (definidos na seção 2.2.1) relacionam-se da seguinte forma:

$$\beta = \theta - \theta_r. \quad (26)$$

A relação entre o deslocamento angular  $\theta_r$  e a velocidade do rotor  $\omega_r$  é dada por:

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}. \quad (27)$$

Finalmente, para os circuitos do rotor, a transformação das variáveis  $abc$  para o referencial girante  $dq0$  está apresentada em (28).

$$\mathbf{f}'_{qd0r} = \mathbf{K}_r \mathbf{f}'_{abcr} \quad (28)$$

onde:

$$(\mathbf{f}'_{qd0r})^T = [f'_{qr} \ f'_{dr} \ f'_{0r}] \quad (29)$$

$$(\mathbf{f}'_{abcr})^T = [f'_{ar} \ f'_{br} \ f'_{cr}] \quad (30)$$

$$\mathbf{K}_r = \begin{bmatrix} \cos \beta & \cos \left( \beta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \beta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \beta & \sin \left( \beta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \beta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (31)$$

A aplicação das transformações (21) e (28) em (1) e (2) resultam nas equações de tensão da MIDA nas coordenadas  $dq$ , expressas na forma matricial em (32). Considerou-se que as correntes de estator e rotor são equilibradas ( $i_{0s}$  e  $i'_{0r}$  iguais a zero), razão pela qual o conjunto de equações correspondentes foi omitido.

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v'_{qr} \\ v'_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_{ss} & \omega L_{ss} & pL_M & \omega L_M \\ -\omega L_{ss} & r_s + pL_{ss} & -\omega L_M & pL_M \\ pL_M & (\omega - \omega_r)L_M & r'_r + pL'_{rr} & (\omega - \omega_r)L'_{rr} \\ -(\omega - \omega_r)L_M & pL_M & -(\omega - \omega_r)L'_{rr} & r'_r + pL'_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix}. \quad (32)$$

onde:

$$L_M = \frac{3}{2} L_{ms}, \quad (33)$$

$$L_{ss} = L_{ls} + L_M, \quad (34)$$

$$L'_{rr} = L'_{lr} + L_M. \quad (35)$$

#### 2.2.4 EQUAÇÕES DE TORQUE NA MIDA PARA REFERENCIAL $dq\theta$ GENÉRICO

A expressão do torque eletromagnético na MIDA em coordenadas  $dq$  pode ser obtida substituindo as equações de transformação (21) e (28) em (19). Como resultado obtém-se:

$$T_E = \left(\frac{P}{2}\right) [(\mathbf{K}_s)^{-1} \mathbf{i}_{qd0s}]^T \frac{\partial(\mathbf{L}'_{sr})}{\partial \theta_r} (\mathbf{K}_r)^{-1} \mathbf{i}'_{qd0r}. \quad (36)$$

Como resultado, obtém-se a expressão do torque eletromagnético em função das correntes nos eixos  $dq$ :

$$T_E = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) L_M (i_{qs} i'_{dr} - i_{ds} i'_{qr}). \quad (37)$$

#### 2.2.5 EQUAÇÕES DE TENSÃO NA MIDA PARA REGIME PERMANENTE SENOIDAL

As equações de tensão da MIDA para a operação em regime permanente senoidal podem ser obtidas a partir de (32), considerando, por exemplo, um referencial fixo no estator. Neste caso, a aplicação de tensões senoidais equilibradas no estator e no rotor da máquina resultará em tensões  $v_{qs}$ ,  $v_{ds}$ ,  $v'_{qr}$  e  $v'_{dr}$  também senoidais.

A transformação indicada em (21) para o caso do referencial fixo no estator ( $\omega = 0$ ) resulta em tensões  $v_{qs}$  e  $v_{ds}$  senoidais, com a mesma frequência  $\omega_2 = 2\pi f_2$  do sistema conectado ao estator. Por outro lado, da operação em regime permanente decorre que as tensões de rotor referidas ao estator ( $v'_{qr}$  e  $v'_{dr}$ ) são também senoidais e apresentam, necessariamente, a mesma frequência  $\omega_2$  das tensões de estator ( $v_{qs}$  e  $v_{ds}$ ).

As equações de tensão na MIDA para um referencial fixo no estator podem ser apresentadas na forma matricial.

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v'_{qr} \\ v'_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_{ss} & 0 & pL_M & 0 \\ 0 & r_s + pL_{ss} & 0 & pL_M \\ pL_M & (-\omega_r)L_M & r'_r + pL'_{rr} & (0 - \omega_r)L'_{rr} \\ \omega_r L_M & pL_M & \omega_r L'_{rr} & r'_r + pL'_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix} \quad (38)$$

Em regime permanente senoidal, os fasores de tensão e corrente na fase  $a$  do estator e rotor relacionam-se de acordo com:

$$\begin{aligned}
\sqrt{2}\dot{V}_{as} &= \dot{V}_{qs} - j\dot{V}_{ds} = [(r_s + pL_{ss})\dot{i}_{qs} + pL_M\dot{i}'_{qr}] - j[(r_s + pL_{ss})\dot{i}_{ds} + pL_M\dot{i}'_{dr}] \\
&= (r_s + pL_{ss})(\dot{i}_{qs} - j\dot{i}_{ds}) + pL_M(\dot{i}'_{qr} - j\dot{i}'_{dr}) \\
&= (r_s + pL_{ss})\sqrt{2}\dot{i}_{as} + pL_M\sqrt{2}\dot{i}'_{ar},
\end{aligned} \tag{39}$$

$$\begin{aligned}
\sqrt{2}\dot{V}'_{ar} &= \dot{V}'_{qr} - j\dot{V}'_{dr} \\
&= [pL_M\dot{i}_{qs} - \omega_r L_M\dot{i}_{ds} + (r'_r + pL'_{rr})\dot{i}'_{qr} - \omega_r L'_{rr}\dot{i}'_{dr}] \\
&\quad - j[\omega_r L_M\dot{i}_{qs} + pL_M\dot{i}_{ds} + \omega_r L'_{rr}\dot{i}'_{qr} + (r'_r + pL'_{rr})\dot{i}'_{dr}] \\
&= (pL_M - j\omega_r L_M)\dot{i}_{qs} + (-jpL_M - \omega_r L_M)\dot{i}_{ds} \\
&\quad + (r'_r + pL'_{rr} - j\omega_r L'_{rr})\dot{i}'_{qr} + (-\omega_r L'_{rr} - jr'_r - jpL'_{rr})\dot{i}'_{dr} \\
&= (pL_M - j\omega_r L_M)(\dot{i}_{qs} - j\dot{i}_{ds}) \\
&\quad + (r'_r + pL'_{rr} - j\omega_r L'_{rr})(\dot{i}'_{qr} - j\dot{i}'_{dr}) \\
&= (p - j\omega_r)L_M\sqrt{2}\dot{i}_{as} + (r'_r + (p - j\omega_r)L'_{rr})\sqrt{2}\dot{i}'_{ar},
\end{aligned} \tag{40}$$

e na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{as} \\ \dot{V}'_{ar} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r_s + pL_{ss}) & pL_M \\ (p - j\omega_r)L_M & (r'_r + (p - j\omega_r)L'_{rr}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{as} \\ \dot{i}'_{ar} \end{bmatrix}. \tag{41}$$

Considerando que as correntes no estator e rotor – referidas ao estator – são senoidais e apresentam a mesma frequência angular  $\omega_2$ , o operador  $p$  pode ser substituído em (41) por  $j\omega_2$  resultando em:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{as} \\ \dot{V}'_{ar} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r_s + j\omega_2 L_{ss}) & j\omega_2 L_M \\ j(\omega_2 - \omega_r)L_M & (r'_r + j(\omega_2 - \omega_r)L'_{rr}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{as} \\ \dot{i}'_{ar} \end{bmatrix} \tag{42}$$

### 2.2.6 EQUAÇÕES DE TORQUE NA MIDA PARA REGIME PERMANENTE SENOIDAL

Partindo de (37) pode-se obter a equação do torque eletromagnético para o regime permanente senoidal, dada por:

$$T_E = 3 \left( \frac{P}{2} \right) L_M \text{Re} [j\dot{i}'_{ar}\dot{i}_{as}^*]. \tag{43}$$

Foram consideradas as seguintes relações para o desenvolvimento da expressão do torque: (i)  $\sqrt{2}\dot{i}_{as}^* = \dot{i}_{qs} + j\dot{i}_{ds}$ ; (ii)  $\sqrt{2}\dot{i}'_{ar} = \dot{i}'_{qr} - j\dot{i}'_{dr}$ .

## 2.3 FUNCIONAMENTO DO TRANSFORMADOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL

As próximas seções apresentam importantes aspectos do funcionamento do VFT, considerando sua aplicação na interligação de sistemas elétricos. Como contribuição para entendimento do funcionamento do equipamento, as relações entre as grandezas elétricas e mecânicas no VFT foram demonstradas através do modelo matemático desenvolvido, utilizando uma nova abordagem.

### 2.3.1 VELOCIDADE DO ROTOR vs. DIFERENÇA ENTRE AS FREQUÊNCIAS

Esta seção apresenta a relação existente entre a velocidade do rotor do VFT e a diferença entre as frequências dos sistemas que alimentam os enrolamentos do estator e rotor da MIDA. Partindo do sistema genérico apresentado na Figura 2-3, considera-se que o Sistema 1 alimenta os enrolamentos do rotor com tensões senoidais equilibradas, de frequência angular elétrica  $\omega_1 = 2\pi f_1$ . Da mesma forma, os enrolamentos do estator são alimentados com tensões senoidais equilibradas do Sistema 2, que opera com frequência angular elétrica  $\omega_2 = 2\pi f_2$ .

Conforme abordado anteriormente, na operação em regime permanente senoidal descrita em (42), a frequência das grandezas elétricas no rotor ( $\dot{V}'_{ar}$  e  $\dot{I}'_{ar}$ ), quando referidas ao estator, apresenta obrigatoriamente o mesmo valor da frequência das grandezas do estator ( $\dot{V}_{as}$  e  $\dot{I}_{as}$ ). Desta forma, considerando (i) a frequência angular das grandezas elétricas aplicadas ao estator igual a  $\omega_2$ , (ii) a frequência angular das grandezas aplicadas aos terminais do rotor igual a  $\omega_1$  e (iii) a frequência angular das grandezas do rotor referidas ao estator igual a  $(\omega_1 + \omega_r)$ , pode-se escrever.

$$\omega_2 = (\omega_1 + \omega_r) \quad (44)$$

ou ainda

$$\omega_r = (\omega_2 - \omega_1), \quad (45)$$

$$\eta_{rm} = (f_2 - f_1) \frac{120}{P}. \quad (46)$$

onde  $\eta_{rm}$  é a velocidade de rotação e  $P$  é o número de polos da MIDA (VFT).

A equação (46) indica que a velocidade do rotor da MIDA é proporcional ao escorregamento de frequência verificado entre os sistemas que se conectam aos seus terminais de rotor e estator. Neste sentido, a velocidade do VFT – em regime

permanente – será sempre nula em uma conexão síncrona, ou seja, no caso de existir uma interligação CA em paralelo com o VFT. De outra forma, em uma conexão assíncrona a velocidade de rotação do rotor será, em geral, diferente de zero, pois sempre haverá algum escorregamento de frequência entre os sistemas interligados pelo VFT. Ressalta-se que na conexão assíncrona de sistemas de mesma frequência nominal, esses desvios de frequência tendem a ser bastante reduzidos na operação normal, em função da ação contínua do controle carga-frequência dos sistemas interligados.

Como exemplo, um desvio de frequência de 0,1 Hz resulta em velocidade de rotação de 3 rpm, considerando um VFT baseado em uma máquina de quatro polos. Tal velocidade pode ser considerada baixa quando comparada com valores típicos para a operação de máquinas de indução convencionais (3600, 1800 rpm, por exemplo).

É importante observar que a conexão assíncrona de dois sistemas com o VFT só é viável porque o rotor pode girar, compensando continuamente os desvios de frequência entre os sistemas verificados em cada condição operativa. A rotação do rotor será ditada pela necessidade de manter em sincronismo os campos magnéticos produzidos pelos enrolamentos de estator e rotor, viabilizando a transferência estável de energia entre os dois sistemas. Neste sentido, só há um valor de velocidade de rotor – indicada em (46) – capaz de sincronizar os campos produzidos pelos enrolamentos da máquina. Para qualquer outro valor de velocidade do rotor, a interação entre os campos resultará em torque pulsante, não sendo possível a operação estável.

Deve-se ressaltar ainda que o sentido de rotação do rotor do VFT dependerá da diferença entre as frequências dos dois sistemas. Ou seja, o rotor poderá girar em qualquer sentido dependendo do sistema no qual a frequência elétrica está maior.

### **2.3.2 POTÊNCIA ATIVA vs. TORQUE ELETROMAGNÉTICO**

Esta seção apresenta a relação que existe entre a potência ativa que atravessa o entreferro do VFT e o torque eletromagnético produzido, considerando a operação em regime permanente senoidal e o sistema genérico apresentado na Figura 2-7. Na figura estão identificadas as potências  $P_S$  e  $P_R$  referentes às potências ativas nos enrolamentos de estator e rotor, respectivamente. A potência mecânica no eixo do VFT está identificada como  $P_D$ .

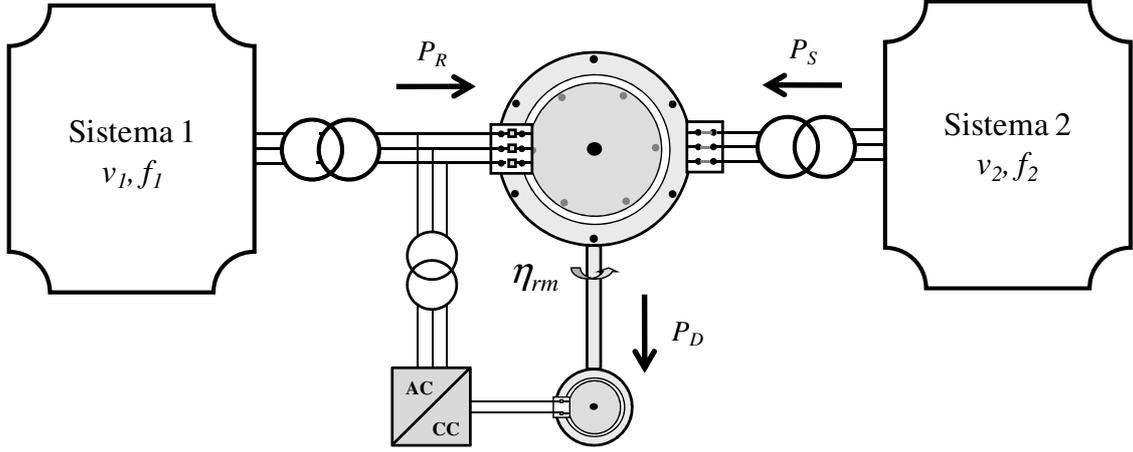


Figura 2-7: Balanço de potência no VFT.

Partindo de (46) e desprezando as perdas ôhmicas nos enrolamentos de estator e rotor obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{as} \\ \dot{V}'_{ar} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega_2 L_{ss} & j\omega_2 L_M \\ j(\omega_2 - \omega_r)L_M & j(\omega_2 - \omega_r)L'_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{as} \\ \dot{I}'_{ar} \end{bmatrix}. \quad (47)$$

Em regime permanente senoidal, as potências  $P_S$  e  $P_R$  podem ser calculadas através de:

$$\begin{aligned} P_S &= \text{Re}[3\dot{V}_{as}\dot{I}_{as}^*] = 3\text{Re}[(j\omega_2 L_{ss}\dot{I}_{as} + j\omega_2 L_M\dot{I}'_{ar})\dot{I}_{as}^*] \\ &= 3\text{Re}[j\omega_2 L_{ss}|\dot{I}_{as}|^2 + j\omega_2 L_M\dot{I}'_{ar}\dot{I}_{as}^*] = 3\omega_2 L_M \text{Re}[j\dot{I}'_{ar}\dot{I}_{as}^*], \end{aligned} \quad (48)$$

$$\begin{aligned} P_R &= \text{Re}[3\dot{V}'_{ar}\dot{I}'_{ar}^*] = 3\text{Re}[(j(\omega_2 - \omega_r)L_M\dot{I}_{as} + j(\omega_2 - \omega_r)L'_{rr}\dot{I}'_{ar})\dot{I}'_{ar}^*] = \\ &3\text{Re}[j(\omega_2 - \omega_r)L_M\dot{I}_{as}\dot{I}'_{ar}^* + j(\omega_2 - \omega_r)L'_{rr}|\dot{I}'_{ar}|^2] = \\ &3(\omega_2 - \omega_r)L_M \text{Re}[j\dot{I}_{as}\dot{I}'_{ar}^*] = 3(\omega_r - \omega_2)L_M \text{Re}[j\dot{I}'_{ar}\dot{I}_{as}^*], \end{aligned} \quad (49)$$

onde  $\omega_2$  é a frequência angular elétrica das tensões aplicadas ao estator e  $\omega_r$  é a velocidade angular elétrica do rotor do VFT.

A potência mecânica no eixo do VFT pode, então, ser obtida através da expressão  $P_D = P_S + P_R$ , considerando que a variação do campo magnético é nula a cada ciclo.

$$\begin{aligned} P_D &= P_S + P_R = 3\omega_2 L_M \text{Re}[j\dot{I}'_{ar}\dot{I}_{as}^*] + 3(\omega_2 - \omega_r)L_M \text{Re}[j\dot{I}_{as}\dot{I}'_{ar}^*] \\ &= 3\omega_2 L_M \text{Re}[j\dot{I}'_{ar}\dot{I}_{as}^*] - 3(\omega_2 - \omega_r)L_M \text{Re}[j\dot{I}'_{ar}\dot{I}_{as}^*] \\ &= 3\omega_r \text{Re}[j\dot{I}'_{ar}\dot{I}_{as}^*] \end{aligned} \quad (50)$$

A Tabela 2-1 apresenta um resumo das expressões de potência e torque no VFT, considerando a operação em regime permanente senoidal.

Tabela 2-1: Resumo das expressões de potência e torque no VFT, na operação em regime permanente senoidal.

Torque eletromagnético ( <i>para P=2</i> )	$T_E = 3L_M Re[ji'_{ar}i^*_{as}]$
Potência ativa entrando pelo estator do VFT	$P_S = 3\omega_2 L_M Re[ji'_{ar}i^*_{as}]$
Potência ativa entrando pelo rotor do VFT	$P_R = 3(\omega_r - \omega_2)L_M Re[ji'_{ar}i^*_{as}]$
Potência mecânica saindo pelo eixo do VFT	$P_D = 3\omega_r L_M Re[ji'_{ar}i^*_{as}]$

A comparação das expressões indicadas na Tabela 2-1 resulta nas relações entre a potência e o torque eletromagnético no VFT, fundamentais para o entendimento do funcionamento do VFT. Substituindo (43) em (48), (49) e (50), obtém-se:

$$P_S = \omega_2 T_E, \quad (51)$$

$$P_R = (\omega_r - \omega_2) T_E. \quad (52)$$

$$P_D = \omega_r T_E. \quad (53)$$

Substituindo (51) em (53), resulta:

$$P_D = \frac{\omega_r}{\omega_2} P_S. \quad (54)$$

Observa-se em (51), (52) e (53) que na operação com escorregamento de frequência nulo, caracterizada por  $(\omega_2 - \omega_1) = \omega_r = 0$ , o rotor permanece parado e toda a potência ativa que entra pelo estator (ou rotor) sai pelo rotor (ou estator). Nesta condição, é nula a potência mecânica no eixo do VFT e o dispositivo opera de forma similar a um transformador.

Na condição mais geral, na qual o escorregamento de frequência não é nulo, o rotor do VFT gira e parte da potência elétrica que entra no VFT é convertida em energia mecânica em seu eixo. Neste caso, os efeitos de transformador e de máquina rotativa se sobrepõem no VFT.

De acordo com (53), a parcela convertida em potência mecânica cresce à medida que o escorregamento de frequência entre os sistemas aumenta. A condição

limite corresponde à operação como máquina síncrona, na qual a corrente no rotor é contínua (frequência nula) e o desvio de frequência é máximo. Neste caso, na operação como motor, toda a potência elétrica é convertida em movimento na máquina.

A Figura 2-8 ilustra o balanço do processo de conversão de energia no VFT, em função do escorregamento de frequência entre os sistemas interligados.

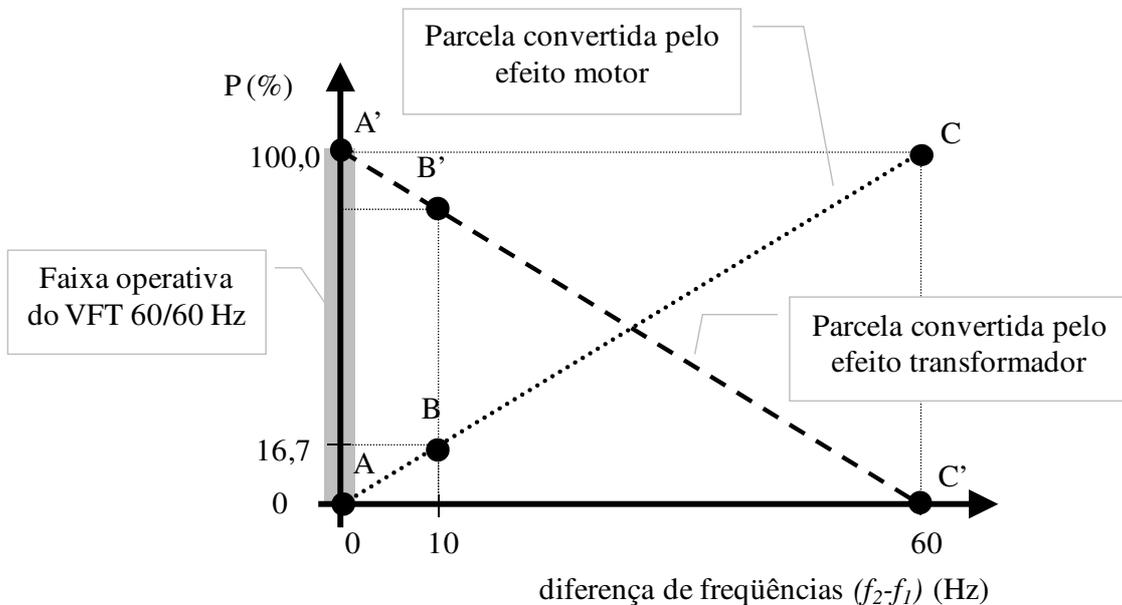


Figura 2-8: Balanço de energia no VFT em função da diferença de frequência.

Na Figura 2-8 os pontos A e A' representam a condição operativa na qual a diferença de frequência entre os sistemas interligados é nula. É o caso de uma conexão entre sistemas síncronos ou ainda entre sistemas assíncronos que estão, transitoriamente, à mesma frequência elétrica. Nesta condição operativa, toda a energia é convertida pelo efeito transformador, não havendo movimento do rotor.

Na prática, a faixa de operação de um VFT real corresponde à faixa cinza indicada na figura. De fato, entre sistemas reais observam-se pequenos desvios de frequência e o rotor do VFT gira de forma a compensar tais desvios. Neste caso, uma pequena parcela da energia elétrica é convertida em movimento no rotor.

Os pontos B e B' representam a conexão de sistemas assíncronos de frequência nominal distinta (60 e 50 Hz). Nesta condição, 16,7% da energia elétrica que entra no VFT é convertida em energia mecânica no eixo do VFT ( $P_D = \omega_r / \omega_2 P_S$ ). O restante da energia (83,3%) sai pelos enrolamentos da máquina sob forma de energia elétrica. Ressalta-se que, nesta condição, o sistema de acionamento deve ser capaz de devolver ao sistema a energia que foi drenada pelo eixo do VFT. Ou seja, a máquina que aplica

torque deve funcionar como gerador, convertendo a energia mecânica disponível no eixo em energia elétrica a ser devolvida ao sistema através de conversor eletrônico.

Os pontos C e C' correspondem a uma condição na qual a frequência no estator é 60 Hz e no rotor é igual a zero (CC). É o caso da operação como máquina síncrona, na qual há conversão de toda energia elétrica em movimento, no caso da operação como motor.

### 2.3.3 TORQUE ELETROMAGNÉTICO vs. TORQUE EXTERNO APLICADO

Outro aspecto fundamental do funcionamento do VFT que fica evidente em (51) e (52) é o fato da potência ativa que atravessa o entreferro da máquina ser nula nos casos em que o torque eletromagnético é zero. Se há transferência de potência pelo VFT, haverá também torque eletromagnético. De fato, o torque eletromagnético na MIDA resulta da interação entre dois campos magnéticos e só é diferente de zero quando há defasagem angular entre os campos de estator e rotor.

Ocorre que como o rotor do VFT pode girar, a tendência natural será sempre a de alinhamento dos campos produzidos pelo estator e rotor. E uma vez alinhados os campos, não é possível transferir potência pelo VFT pois o torque eletromagnético é nulo. Assim, para que seja possível estabelecer fluxo de potência no VFT faz-se necessária a aplicação de torque externo no eixo da máquina, produzindo defasagem angular entre os campos de estator e rotor. Como consequência, a interação entre os campos produzirá torque eletromagnético, que tende a se opor ao torque externo aplicado.

A dinâmica do rotor do VFT será determinada por (55), onde J é o momento de inércia e D a constante de amortecimento do VFT.

$$T_D - T_E = J \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r. \quad (55)$$

Na operação em regime permanente, desprezado o atrito viscoso, o torque eletromagnético  $T_E$  produzido pela interação dos campos será igual ao torque externo  $T_D$  aplicado e a velocidade do rotor será constante. Conforme abordado anteriormente, a velocidade do rotor em regime permanente dependerá do escorregamento de frequência verificado entre os sistemas interligados.

Nos VFT em operação, a aplicação e o controle do torque externo é realizado por um sistema de acionamento eletrônico baseado em uma máquina de corrente contínua, acoplada de forma solidária ao eixo do VFT. O sistema de acionamento deve estar apto a aplicar torque em ambas direções, mesmo com o rotor parado.

### 2.3.4 POTÊNCIA ATIVA vs. DEFASAGEM ANGULAR IMPOSTA PELO VFT

O fluxo de potência ativa pelo VFT é influenciado pela reatância de dispersão dos enrolamentos da MIDA, pelas impedâncias equivalentes dos sistemas elétricos e pela defasagem angular entre os campos de estator e rotor do VFT, imposta pela aplicação de torque externo no eixo do equipamento. De forma a quantificar estes efeitos, a equação (47) é reescrita para obtenção do circuito equivalente para o VFT:

$$\begin{aligned}\dot{V}_{as} &= j\omega_2 L_{ss} \dot{I}_{as} + j\omega_2 L_M \dot{I}'_{ar} = j\omega_2 (L_{ls} + L_M) \dot{I}_{as} + j\omega_2 L_M \dot{I}'_{ar} \\ &= j\omega_2 L_{ls} \dot{I}_{as} + j\omega_2 L_M (\dot{I}_{as} + \dot{I}'_{ar})\end{aligned}\quad (56)$$

$$\begin{aligned}\dot{V}'_{ar} &= j(\omega_2 - \omega_r) L_M \dot{I}_{as} + j(\omega_2 - \omega_r) L'_{lr} \dot{I}'_{ar} \\ &= j(\omega_2 - \omega_r) L_M \dot{I}_{as} + j(\omega_2 - \omega_r) (L'_{lr} + L_M) \dot{I}'_{ar} \\ &= j(\omega_2 - \omega_r) L_M (\dot{I}_{as} + \dot{I}'_{ar}) + j(\omega_2 - \omega_r) L'_{lr} \dot{I}'_{ar}\end{aligned}\quad (57)$$

Definindo o desvio de frequência  $s = 1 - \omega_r/\omega_2$ , (57) pode ser reescrita conforme indicado a seguir:

$$\frac{\dot{V}'_{ar}}{s} = j\omega_2 L_M (\dot{I}_{as} + \dot{I}'_{ar}) + j\omega_2 L'_{lr} \dot{I}'_{ar}\quad (58)$$

Na operação com desvio nulo entre as frequências dos sistemas ( $s = 1$ ), a velocidade do rotor  $\omega_r$  é igual a zero e (58) pode ser expressa por:

$$\dot{V}'_{ar} = j\omega_2 L_M (\dot{I}_{as} + \dot{I}'_{ar}) + j\omega_2 L'_{lr} \dot{I}'_{ar}\quad (59)$$

O circuito equivalente da Figura 2-9 pode ser obtido a partir de (56) e (59). No modelo, foram desprezadas as perdas elétricas e foi considerada a operação com desvio de frequência nulo ( $s = 1$ ). Embora não tenha sido apresentado, um circuito equivalente mais geral pode ser obtido a partir das equações (56) e (58), utilizando as tensões  $\dot{V}_{as}$  e  $\dot{V}'_{ar}/s$ .

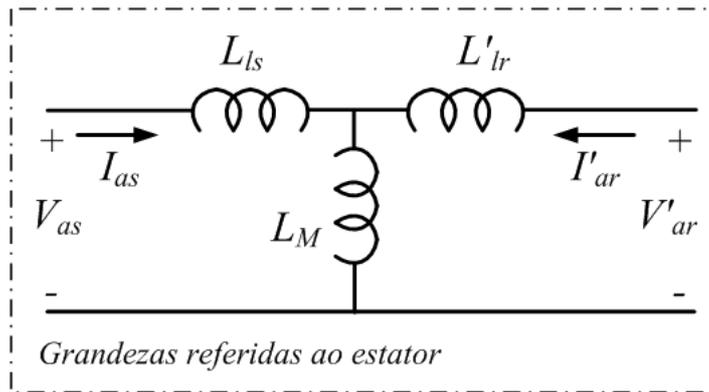


Figura 2-9: Circuito equivalente do VFT para regime permanente, com  $(\omega_2 - \omega_1) = 0$ , desprezando as perdas ôhmicas no rotor e estator.

Como em qualquer circuito em corrente alternada, o fluxo de potência ativa no VFT dependerá das características elétricas do dispositivo, da amplitude de  $\dot{V}_{as}$  e  $\dot{V}'_{ar}$  e da defasagem angular entre estas tensões. Deve-se ressaltar que a tensão  $\dot{V}'_{ar}$  é a tensão aplicada ao rotor refletida para os terminais do estator, razão pela qual é influenciada pela posição relativa do rotor em relação ao estator.

A Figura 2-10 apresenta o diagrama fasorial do VFT, considerando as mesmas simplificações adotadas para obtenção do circuito equivalente da Figura 2-9. Registre-se que a representação de  $\dot{V}_{as}$ ,  $\dot{V}'_{ar}$  e  $\dot{V}_{ar}$  em um mesmo diagrama fasorial também é possível para o caso mais geral, com desvio de frequência  $(\omega_2 - \omega_1)$  diferente de zero, desde que consideradas as tensões  $\dot{V}_{as}$  e  $\dot{V}'_{ar}/s$ .

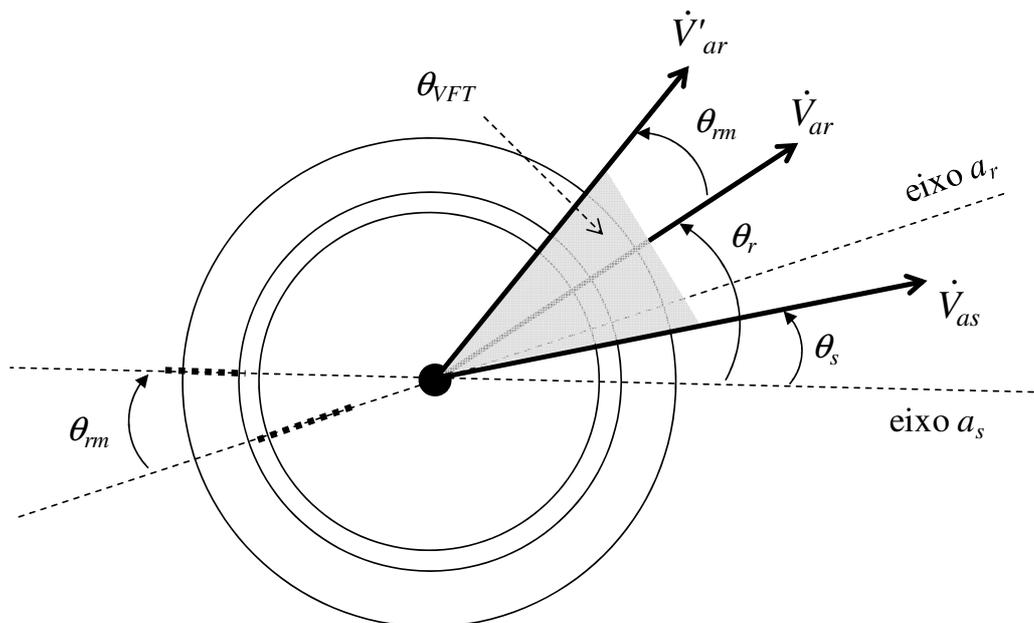


Figura 2-10: Diagrama fasorial do VFT, com  $(\omega_2 - \omega_1) = 0$ , desprezando as perdas ôhmicas no rotor e estator.

No diagrama da Figura 2-10,  $\theta_s$  e  $\theta_r$  são os ângulos de fase das tensões aplicadas ao estator e rotor, respectivamente,  $\theta_{rm}$  corresponde à defasagem angular do rotor em relação ao estator e  $\theta_{VFT}$  é o ângulo de defasagem entre as tensões  $\dot{V}_{as}$  e  $\dot{V}'_{ar}$ . Partindo do diagrama fasorial, determina-se o ângulo  $\theta_{VFT}$  de acordo com:

$$\theta_{VFT} = \theta_s - (\theta_r + \theta_{rm}). \quad (60)$$

Voltando ao circuito equivalente apresentado na Figura 2-9 e considerando a defasagem angular entre  $\dot{V}_{as}$  e  $\dot{V}'_{ar}$  igual a  $\theta_{VFT}$ , o fluxo de potência ativa no VFT pode ser aproximado por:

$$P_s = -P_r = \frac{|\dot{V}_{as}| |\dot{V}'_{ar}|}{\omega_2 (L_{ls} + L'_{lr})} \sin \theta_{VFT} = \frac{|\dot{V}_{as}| |\dot{V}'_{ar}|}{\omega_2 (L_{ls} + L'_{lr})} \sin[\theta_s - (\theta_r + \theta_{rm})] \quad (61)$$

onde  $\omega_2$  é a frequência aplicada aos terminais do estator, nesse caso igual à frequência aplicada ao rotor.

Fica evidente na expressão da potência que a potência ativa que entra pelo estator sai integralmente pelo rotor, em função da operação com desvio de frequência nulo. No caso mais geral, no qual se observam desvios de frequência entre os sistemas elétricos interligados, parte da energia elétrica é convertida em energia mecânica, conforme abordado anteriormente. Na prática os desvios de frequência não são grandes, razão pela qual a expressão é uma boa aproximação.

Outro aspecto a ser observado em (61) é que o valor máximo de transferência de potência pelo VFT é verificado para valor de defasagem  $\theta_{VFT}$  igual a  $\pm 90^\circ$  elétricos. Para uma operação estável em regime permanente e dinâmico, a operação do VFT deve ser realizada com defasagens angular bem inferiores, conforme será demonstrado nos Capítulo 6.

### 2.3.5 CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA NO VFT

De acordo com (61), o controle da defasagem angular  $\theta_{VFT}$  entre os campos do estator e do rotor do VFT permite ajustar o fluxo de potência na interligação. Esta defasagem entre os campos só é conseguida através da aplicação de torque externo no eixo do VFT, conforme discutido nas seções anteriores. Nesse sentido, a forma mais natural para o controle do fluxo de potência ativa no VFT é através do controle do torque aplicado ao eixo desta máquina.

Nos VFT atualmente instalados, a aplicação do torque é realizada por um sistema de acionamento de velocidade variável, baseado em uma máquina de corrente contínua acoplada de forma solidária ao eixo do VFT.

Utiliza-se um sistema de controle em malha fechada, que tem como entrada o erro de potência na interligação. O controlador gera a referência de torque a ser aplicado pelo sistema de acionamento no eixo do VFT, viabilizando o controle contínuo do fluxo de potência entre os dois sistemas.

Os principais aspectos do controle do VFT serão apresentados no Capítulo 4.

## **2.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO**

Este capítulo discutiu os aspectos fundamentais do funcionamento do Transformador de Frequência Variável (VFT), dispositivo que pode ser empregado na interligação de sistemas elétricos síncronos ou assíncronos. Foram demonstradas as principais relações entre as grandezas elétricas e mecânicas no VFT, utilizando o modelo matemático do equipamento.

Como conclusão, as seguintes relações ficaram evidenciadas: (i) a velocidade do VFT é proporcional à diferença de frequência entre os dois sistemas, (ii) o fluxo de potência ativa pelo VFT é função do torque mecânico aplicado ao rotor, e (iii) o fluxo de potência ativa depende do ângulo imposto pelo VFT, entre os campos produzidos pelos enrolamentos de estator e rotor .

### 3 DESENVOLVIMENTO DE MODELO DO VFT PARA SIMULAÇÃO DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

Este capítulo apresenta as principais características de um modelo do VFT desenvolvido para simulação de transitórios eletromagnéticos no programa PSCAD/EMTDC. Além disso, são apresentados resultados de simulação com o modelo desenvolvido, de forma a ilustrar os principais aspectos do funcionamento do VFT abordados no Capítulo 2.

O objetivo é dispor de um modelo mais completo, que permita validar o modelo que será apresentado no Capítulo 5 para simulação do VFT em programas de transitórios eletromecânicos e comprovar a adequação da estrutura e ajustes de controle propostos no Capítulo 4.

Deve-se ressaltar que na implementação do modelo foram considerados parâmetros de dispositivos reais já instaladas no campo [24].

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO MODELO DO VFT

A Figura 3-1 apresenta os principais elementos do modelo do VFT desenvolvido. Para a máquina de indução de dupla alimentação (MIDA) foi utilizado o modelo [*Wound Rotor Induction Machine*] do PSCAD, na modalidade de controle de torque. Nesta condição, a velocidade fica dependente das demais grandezas.

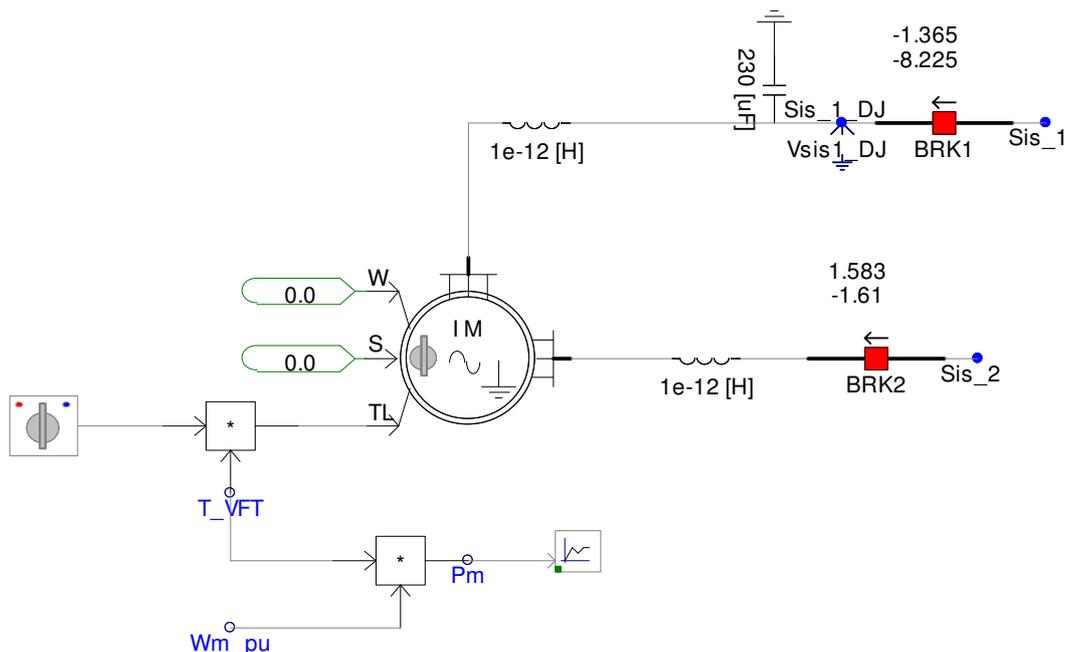


Figura 3-1: Elementos principais do VFT.

Os parâmetros do VFT baseiam-se no equipamento instalado em Langlois (Canadá) e estão apresentados na Tabela 3-1. A constante de inércia  $H$ , de 26 s, é relativamente elevada e confere razoável estabilidade à operação do VFT. A indutância de magnetização do VFT ( $L_M = 5,6$  pu, na base da máquina) impõe absorção de 18 Mvar de potência reativa da rede.

Tabela 3-1: Parâmetros utilizados no modelo de transitórios eletromagnéticos [24].

<b>VFT</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Potência nominal	100 MVA
Número de polos da máquina	4
Tensão nominal do estator	17 kV
Tensão nominal do rotor	17,5 kV
Indutância de dispersão do estator – $L_{ls}$	6%
Indutância de dispersão do rotor – $L_{lr}$	6%
Indutância de magnetização do VFT – $L_M$	560%
Perdas ôhmicas de rotor e estator – $r_r$ e $r_s$	0,5%
Constante de inércia do VFT – $H$	26 s
<b>TRANSFORMADORES ELEVADORES</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Corrente de magnetização dos transformadores	1%
Indutância de dispersão dos transformadores elevadores	10%

No modelo apresentado na Figura 3-1, os enrolamentos de rotor e estator são conectados aos sistemas elétricos 1 e 2 através dos disjuntores tripolares  $BRK_1$  e  $BRK_2$ . Os instantes de fechamento destes disjuntores são calculados para reduzir os transitórios associados à interligação dos dois sistemas, de forma similar ao que é feito em manobras de sincronização de unidades geradoras. A estratégia de sincronização utilizada está apresentada na seção 3.1.1.

O torque  $T_L$  indicado na Figura 3-1 corresponde ao torque externo  $T_D$  a ser aplicado pelo sistema de acionamento, de forma a manter o fluxo na interligação constante, conforme apresentado na seção 3.1.2.

### 3.1.1 SISTEMA DE SINCRONISMO DO VFT

O objetivo do circuito sincronizador é o de reduzir os transitórios de fechamento do VFT que podem ser bastante elevados, dependendo do ângulo de defasagem e do desvio de frequência nos terminais do disjuntor a ser manobrado.

No esquema de sincronização desenvolvido, o disjuntor BRK<sub>2</sub> indicado na Figura 3-1 recebe comando de fechamento independente de qualquer verificação. O fechamento deste disjuntor apenas energiza o VFT pelos terminais do estator. Após o fechamento do disjuntor BRK<sub>2</sub>, inicia-se a fase de sincronização do VFT, adotando-se o seguinte procedimento automático:

- **Fase 1 – ajuste da velocidade do rotor:** calcula-se a diferença de frequência entre os sistemas 1 e 2, determinando-se a velocidade necessária para o rotor. Aplica-se torque no eixo do VFT até que a velocidade desejada seja obtida, sincronizando os campos do rotor e do estator;

- **Fase 2 – cálculo da defasagem angular:** com os campos do rotor e estator sincronizados realiza-se a medição da defasagem angular nos terminais do disjuntor BRK<sub>1</sub>. O cálculo é feito através da comparação das formas de onda de tensão nos terminais do disjuntor, adotando estratégia similar àquela utilizada por relés de verificação de sincronismo;

- **Fase 3 – comparação e fechamento do disjuntor BRK1:** compara-se a defasagem angular obtida na Fase 2 com o ajuste angular pré-definido. O fechamento do disjuntor BRK<sub>1</sub> é liberado quando o módulo da defasagem angular é inferior ao ajuste. Ressalta-se que o fechamento do disjuntor BRK1 interliga efetivamente os sistemas 1 e 2 através do VFT.

Deve-se ressaltar que os transitórios associados ao fechamento crescem à medida que cresce o ângulo de fechamento e o desvio de frequência nos terminais do disjuntor BRK<sub>1</sub>. Na prática, é desejável que o ajuste de verificação de sincronismo (máxima diferença angular e máximo desvio de frequência) seja restritivo o suficiente para evitar transitórios indesejáveis sem, no entanto, dificultar/retardar as manobras de fechamento. Esta questão também se apresenta nas manobras de sincronização de sistemas elétricos através de interligações convencionais.

A Figura 3-2 apresenta o diagrama lógico do esquema de sincronização do VFT. Na figura, a variável [ph\_dif\_DJ1] corresponde à diferença angular verificada entre as tensões nos terminais do disjuntor BRK<sub>1</sub>.

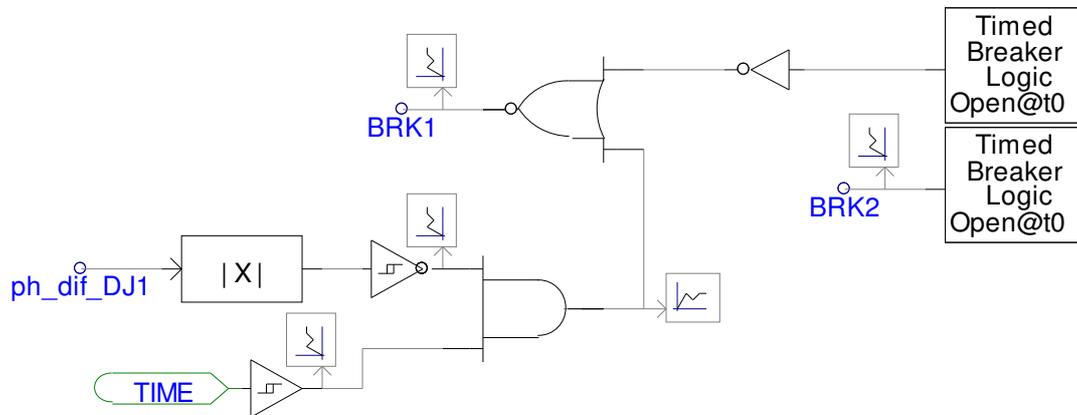


Figura 3-2: Diagrama lógico do esquema de sincronização do VFT.

### 3.1.2 SISTEMA DE CONTROLE DO VFT

A Figura 3-3 apresenta a estrutura básica do sistema de controle do VFT implementado no PSCAD/EMTDC. A estrutura baseia-se em controlador proporcional-integral, com sinal estabilizador derivado da velocidade do rotor. O sinal de erro para o qual o controlador atua é obtido pela comparação (diferença) entre o valor de potência ativa que é solicitado pelo operador  $P_{REF}$  e a potência ativa efetivamente medida na interligação  $P_{VFT}$ . A saída do controlador é o torque  $T_D$  a ser aplicado no eixo do VFT através do sistema de acionamento, de forma a produzir a necessária defasagem angular entre os campos do rotor e estator do VFT.

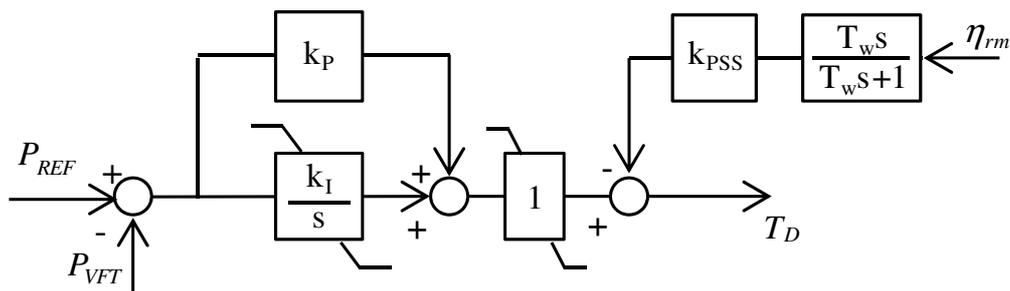


Figura 3-3: Estrutura básica do sistema de controle implementado no modelo.

A definição da estrutura e dos ajustes do controlador, bem como a otimização do desempenho dinâmico do VFT, está apresentada em detalhes no Capítulo 4.

### 3.1.3 SISTEMAS EQUIVALENTES

A Figura 3-4 apresenta o diagrama unifilar do sistema equivalente 1. O sistema é composto por uma fonte trifásica ajustável, de tensão nominal 230 kV, conectada a um transformador trifásico de dois enrolamentos, 133 MVA – 230/17 kV, ligação Y-Y aterrada. O nível de curto-circuito trifásico nos terminais da fonte foi ajustado em 1.000 MVA através da indutância interna à fonte. Para a indutância de dispersão do transformador elevador considerou-se o valor de 10% na base do equipamento.

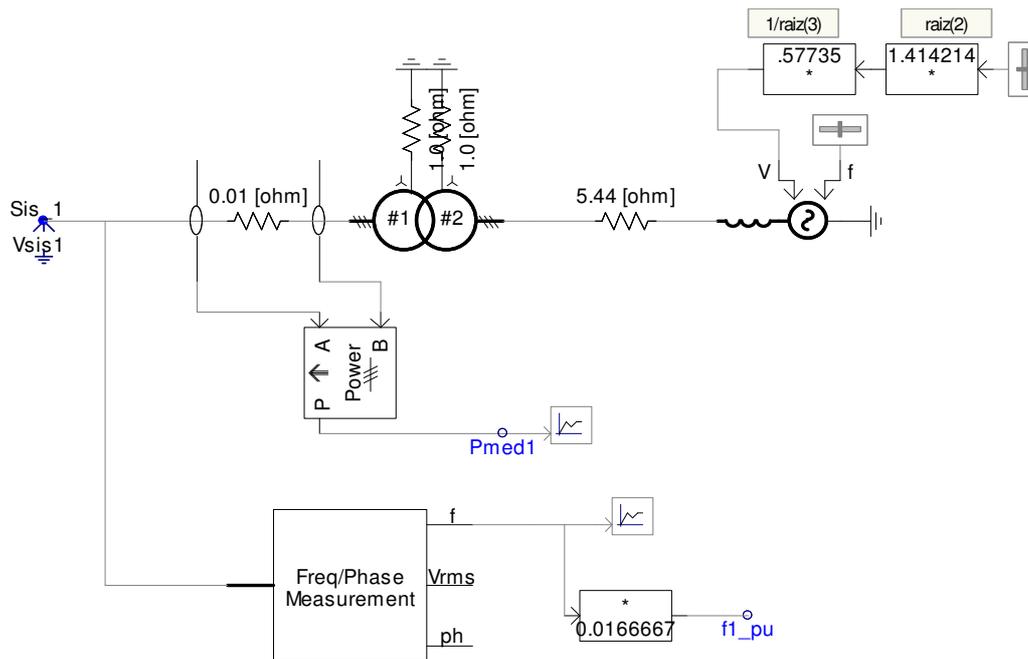


Figura 3-4: Diagrama unifilar geral do sistema equivalente 1.

Conforme pode ser observado na figura, a tensão nos terminais da fonte e a frequência do sistema 1 podem ser ajustadas externamente por meio de controles específicos do PSCAD/EMTDC (entradas V e f). Estes controles permitem realizar variações das grandezas durante a simulação.

Da mesma forma que o sistema 1, o sistema equivalente 2 é composto por uma fonte trifásica ajustável, de tensão nominal 230 kV, conectada a um transformador trifásico de dois enrolamentos, 133 MVA – 230/17 kV, ligação estrela-estrela aterrada. Neste sistema, o nível de curto-circuito trifásico nos terminais da fonte foi ajustado em 800 MVA através de impedância interna à fonte. Para a reatância de dispersão do transformador considerou-se o valor de 10% na base do equipamento.

### 3.2 DESEMPENHO DO VFT NA CONEXÃO DE SISTEMAS SÍNCRONOS

As simulações apresentadas nesta seção ilustram a conexão com o VFT de dois sistemas elétricos síncronos, ou seja, já conectados através de um circuito em corrente alternada. A Figura 3-5 ilustra a configuração utilizada na análise do desempenho do VFT quando o mesmo é empregado na interligação de dois sistemas síncronos de frequência nominal 60 Hz.

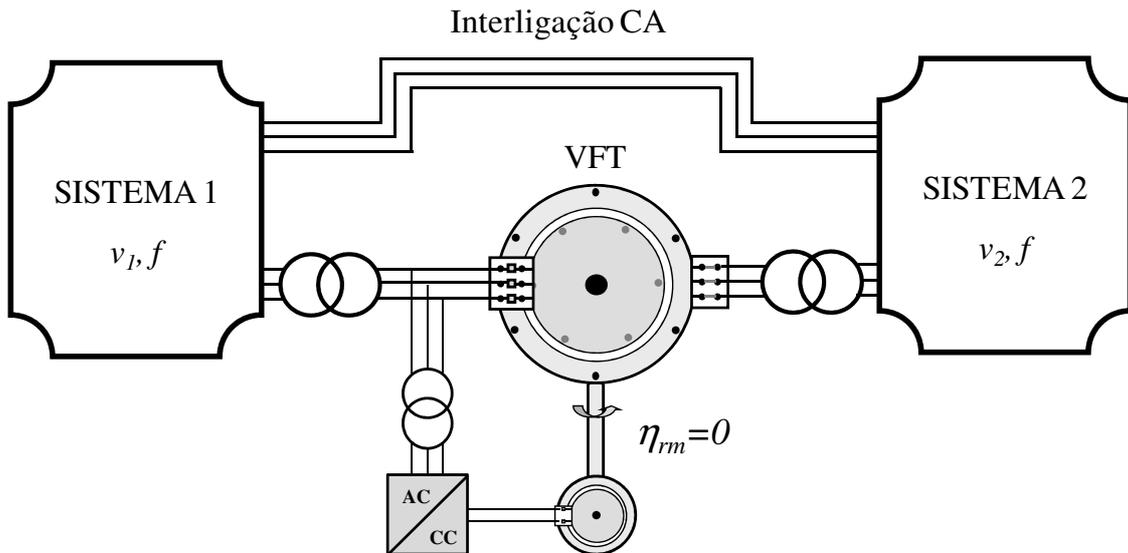


Figura 3-5: Interligação de sistemas síncronos com o VFT.

#### 3.2.1 DEGRAU NA REFERÊNCIA DE POTÊNCIA DO VFT (CASO 1)

As seguintes premissas foram consideradas nas simulações apresentadas nesta seção:

- Foi considerada a simulação de 60s, dos quais os primeiros quinze foram utilizados para energização e sincronismo do VFT;
- Não foram consideradas variações da frequência dos sistemas equivalentes;
- Foram aplicados os seguintes degraus na referência de potência do VFT: (i) de zero para 100 MW ( $t=15$  s), (ii) de 100 MW para zero ( $t=25$  s), (iii) de zero para -50 MW ( $t=30$  s) e (iv) de -50 MW para zero ( $t=40$  s);
- Os ângulos das fontes equivalentes foram ajustados para que o intercâmbio pela interligação em corrente alternada fosse, inicialmente, de 15 MW (do sistema 2 para o sistema 1).

A Figura 3-6 apresenta o sinal de referência de potência ( $P_{REF}$ ) e a potência medida no VFT ( $P_{VFT}$ ). A Figura 3-7 apresenta as mesmas grandezas, considerando a janela de simulação de 14,5 a 20 s. Observa-se que o sinal de referência varia entre 100 e -50 MW, assumindo também valores nulos. O fluxo de potência ativa no VFT segue as referências de potência, mesmo considerando variações em degrau.

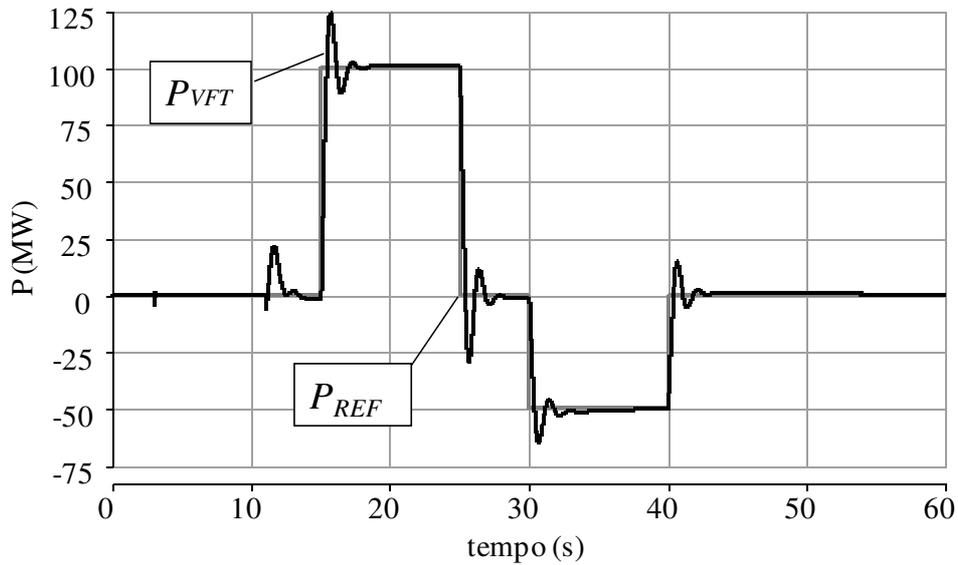


Figura 3-6: Conexão síncrona (caso 1) – Sinal de referência e potência ativa no VFT.

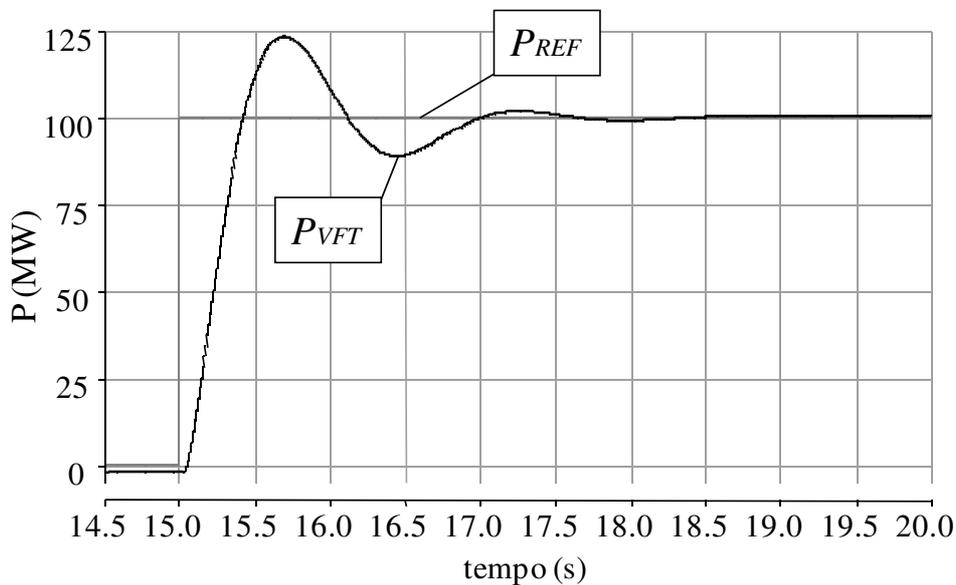


Figura 3-7: Conexão síncrona (caso 1) – Sinal de referência e potência ativa no VFT.

O sistema simulado apresentou amortecimento satisfatório das oscilações do rotor. Contudo, verifica-se ultrapassagem de 25% do valor de referência de potência, desempenho que pode ser bastante melhorado através dos ajustes do sistema de controle, conforme apresentado no Capítulo 4.

A Figura 3-8 apresenta os fluxos de potência ativa no VFT ( $P_{VFT}$ ) e na interligação em corrente alternada ( $P_{INT CA}$ ). Observa-se que até o fechamento do VFT, o fluxo na interligação em corrente alternada era de 15 MW, do sistema 2 para o sistema 1 (valor negativo na figura). Com a sincronização do VFT e com o ajuste do intercâmbio em 100 MW, alteram-se os ângulos nas diversas barras do sistema, o que conduz à modificação no fluxo da interligação em corrente alternada (+8 MW).

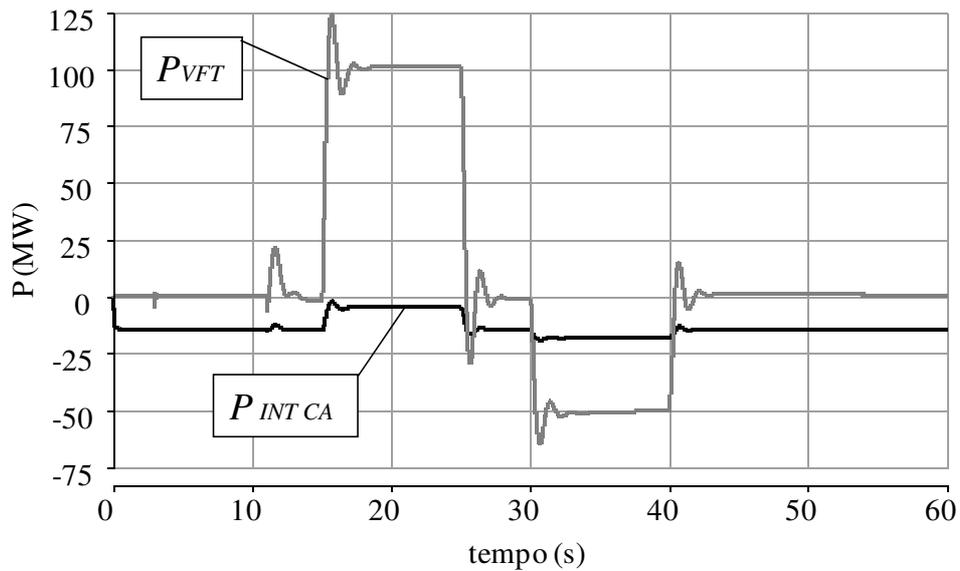


Figura 3-8: Conexão síncrona (caso 1) – Potência ativa na interligação CA e no VFT.

A Figura 3-9 apresenta a defasagem angular  $\theta_{VFT}$  imposta ao VFT. Para ajustar a potência nos valores de referência, a defasagem angular no VFT assume valores na faixa de +10 a +45 graus elétricos.

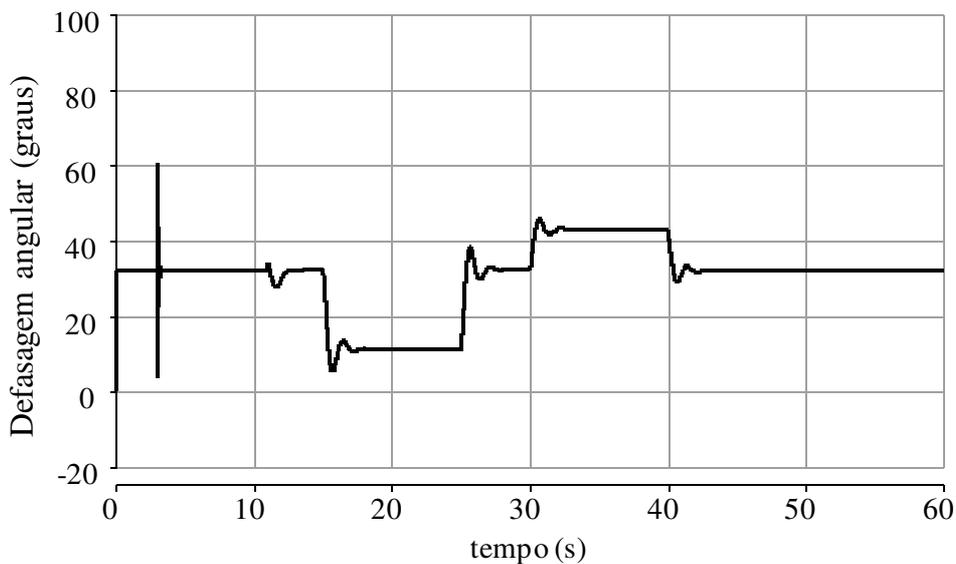


Figura 3-9: Conexão síncrona (caso 1) – Defasagem angular  $\theta_{VFT}$  (graus).

O valor de defasagem angular estabilizado de +10 graus corresponde à transferência de 100 MW do sistema 1 para o sistema 2; a defasagem de 42,5 graus corresponde à transferência de 50 MW do sistema 2 para o sistema 1. No período em que a transferência de energia é nula (até 15, entre 25 e 30 e após 40 segundos), a defasagem angular imposta ao VFT é de 32 graus. Ressalta-se que este valor está associado à defasagem entre as fontes 1 e 2, ajustada para que o intercâmbio na interligação CA fosse de 15 MW do sistema 2 para o sistema 1, antes da conexão do VFT.

A Figura 3-10 apresenta a potência mecânica entregue ou recebida do VFT pelo sistema de acionamento. Observa-se que a troca de energia entre a MIDA e o sistema de acionamento ocorre nos instantes em que muda a referência de potência e a defasagem angular. Na simulação, a potência mecânica assume valores máximos de 1,4 MW, quando se considera a troca de referência de potência de 0 para 100 MW.

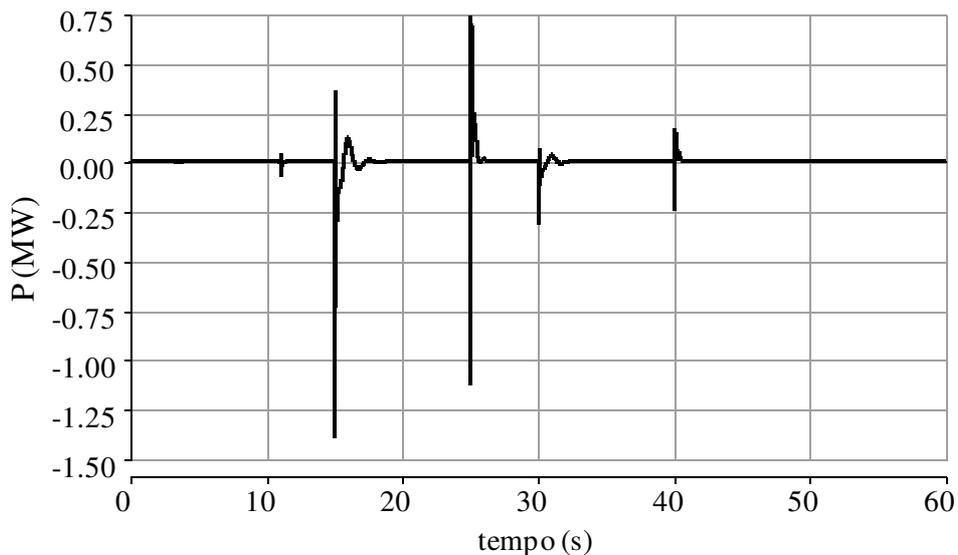


Figura 3-10: Conexão síncrona (caso 1) – Potência mecânica entregue ao VFT.

Nos períodos em que o fluxo de potência no VFT estabiliza-se, a energia trocada entre a MIDA e o sistema de acionamento é nula. Este comportamento está coerente com as equações apresentadas no Capítulo 2, para o caso em que não há desvio de frequência entre os sistemas interligados. Ou seja, a menos das perdas, em regime permanente a potência entregue ao eixo do VFT é nula quando da conexão de sistemas síncronos. Este comportamento é observado mesmo quando há transferência de energia entre os sistemas interligados pelo VFT.

A Figura 3-11 apresenta a velocidade do VFT para as condições analisadas, variando na faixa de -8 e +8 rpm. Ressalta-se que a velocidade do rotor é nula nos períodos em que o VFT transfere energia de forma estável. Este comportamento está coerente com as equações apresentadas no Capítulo 2, considerando que as frequências dos sistemas 1 e 2 são iguais (conexão síncrona).

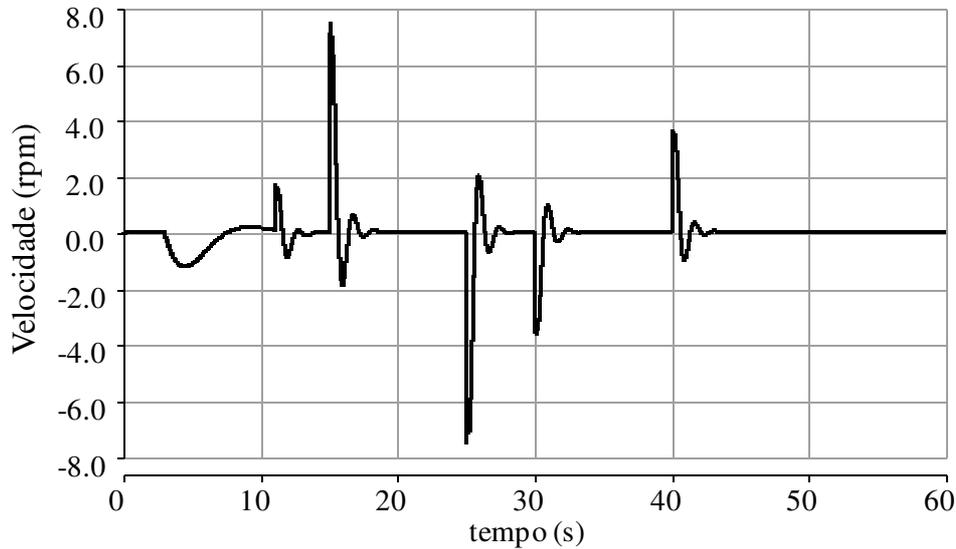


Figura 3-11: Conexão síncrona (caso 1) – Velocidade do rotor do VFT (em rpm).

A Figura 3-12 apresenta o torque aplicado ao eixo do VFT pelo sistema de acionamento. Em regime permanente, o torque é de 1 pu no período em que o fluxo no VFT é de 100 MW (potência máxima, entre 17 e 25 s). Ressalta-se que não foram representados limitadores para o sinal de torque gerado pelo controlador, razão pela qual o torque  $T_D$  assume valores entre -6 e +5 pu. Nas demais simulações, apresentadas nos capítulos subsequentes, as limitações do sinal de referência de torque foram devidamente consideradas.

É interessante observar que há aplicação de torque no eixo do VFT sempre que há fluxo de potência ativa pelo dispositivo, mesmo nos períodos em que a velocidade do rotor é nula. Embora exista torque aplicado no eixo do VFT, a energia trocada entre o sistema de acionamento e o eixo do VFT é nula nos períodos em que a velocidade do rotor é zero. De fato, a potência mecânica é função do torque aplicado, mas também da velocidade de rotação da máquina.

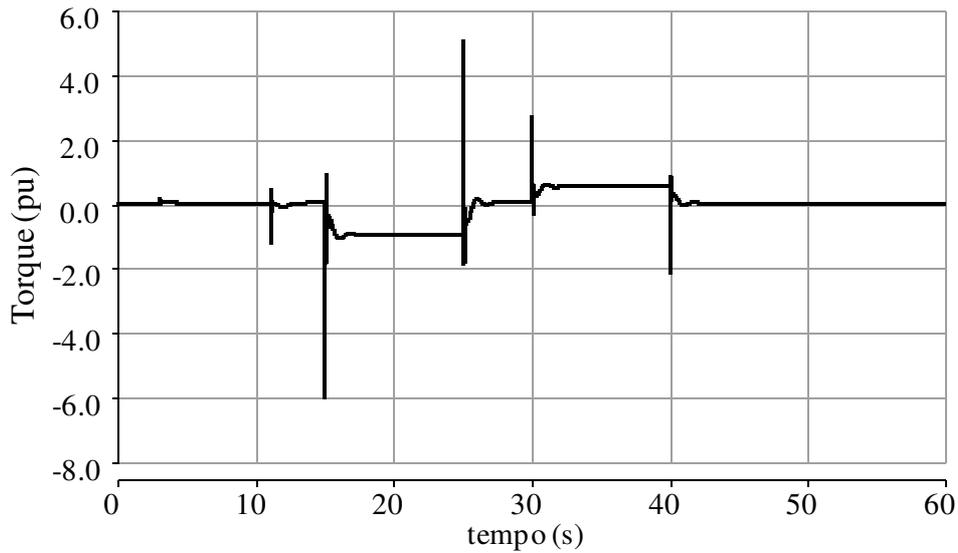


Figura 3-12: Conexão síncrona (caso 1) – Torque  $T_D$  aplicado ao eixo do VFT (pu).

A Figura 3-13 apresenta o valor eficaz das tensões nos sistemas 1 ( $V_{SIS1}$ ) e 2 ( $V_{SIS2}$ ), medidas nos terminais do VFT. Observa-se que a modificação do fluxo de potência no VFT conduz a variações de tensão nos sistemas envolvidos, como em qualquer sistema em corrente alternada. O grau de dependência do perfil de tensão ao fluxo de potência no VFT é função do nível de curto-circuito dos sistemas interligados, nas barras de fronteira, e pelas características elétricas dos elementos do VFT e dos equipamentos de conexão (transformadores elevadores).

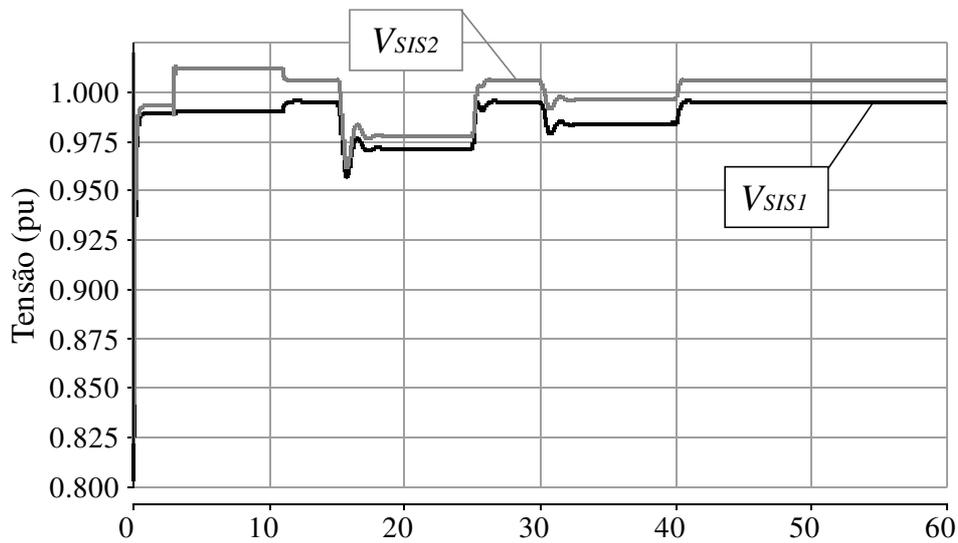


Figura 3-13: Conexão síncrona (caso 1) – Valor eficaz das tensões no sistema (em pu).

### 3.2.2 ABERTURA DA INTERLIGAÇÃO EM CORRENTE ALTERNADA (CASO 2)

As seguintes premissas foram consideradas nas simulações apresentadas nesta seção:

- A simulação é realizada em uma janela de tempo de 60s. Os primeiros 15s são utilizados para energização e sincronismo do VFT;
- A frequência nos sistemas equivalentes não varia no tempo;
- A simulação considera variação na potência de referência de zero para 60 MW ( $t=15$  s), a abertura da interligação CA ( $t=40$  s) e o seu religamento automático ( $t=50$  s);
- Os ângulos das fontes foram ajustados para que o intercâmbio pela interligação em corrente alternada fosse, inicialmente, de 12 MW (do sistema 1 para o sistema 2).

A Figura 3-14 apresenta o sinal de referência de potência para o VFT ( $P_{REF}$ ) e a potência medida nos terminais do rotor ( $P_{VFT}$ ). Observa-se que o VFT segue as referências de potência, com amortecimento satisfatório das oscilações do rotor, mesmo após a abertura da interligação CA. O comportamento do VFT também se mostra adequado após o religamento da interligação CA.

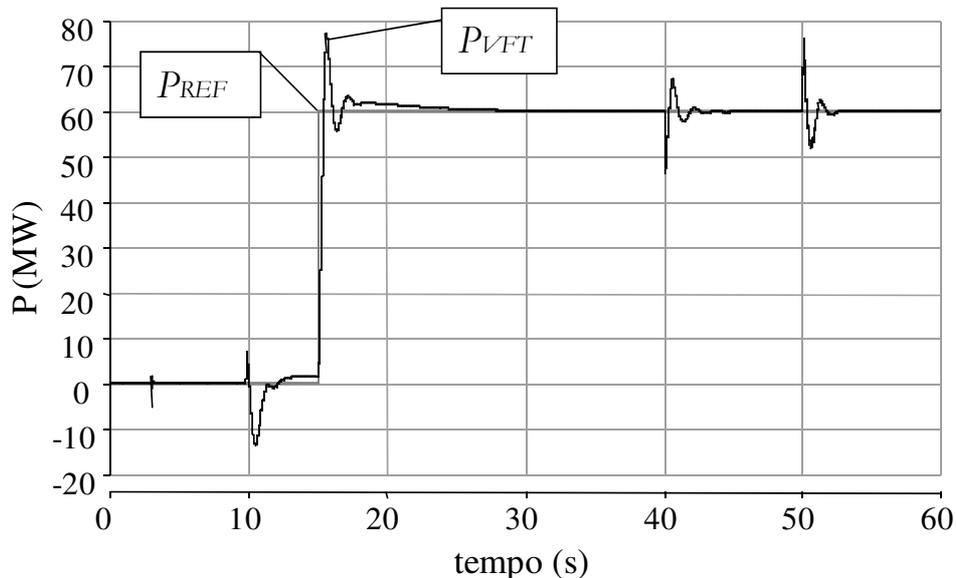


Figura 3-14: Conexão síncrona (caso 2) – Sinal de referência e potência ativa no VFT.

A Figura 3-15 apresenta os fluxos de potência ativa no VFT ( $P_{VFT}$ ) e na interligação em corrente alternada ( $P_{INT CA}$ ). Entre os instantes de tempo 40 e 50s, o

fluxo na interligação CA é nulo, em função da abertura considerada. Neste período, o VFT mantém o fluxo em 60 MW, valor de referência adotado.

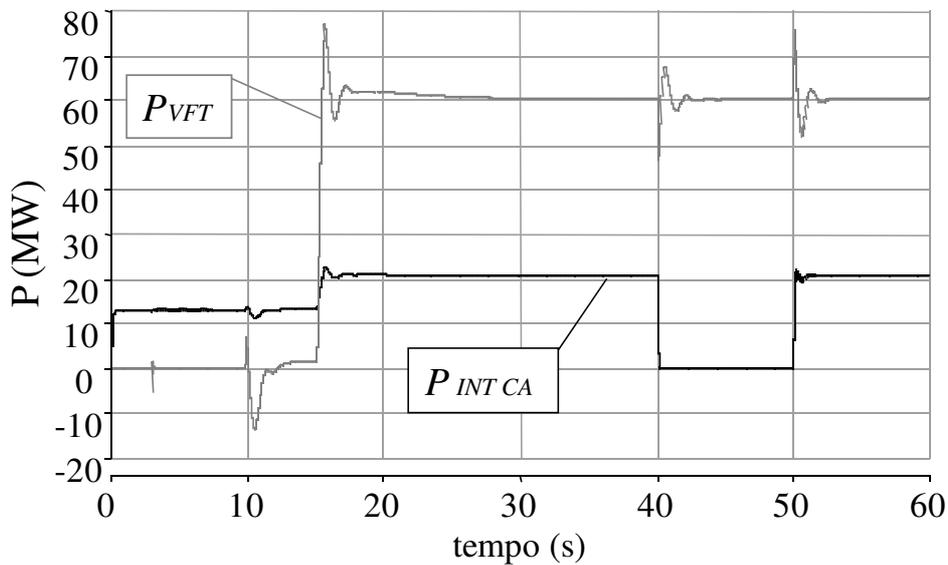


Figura 3-15: Conexão síncrona (caso 2) – Potência ativa na interligação CA e no VFT.

A Figura 3-16 apresenta a defasagem angular  $\theta_{VFT}$  imposta pelo VFT. Para as condições analisadas, a defasagem angular no VFT assume valores na faixa de -17 a -33 graus elétricos. Observa-se que a defasagem angular imposta pelo VFT varia no período em que a interligação em corrente alternada é desligada. Tal variação se faz necessária para que o fluxo no VFT possa ser mantido constante.

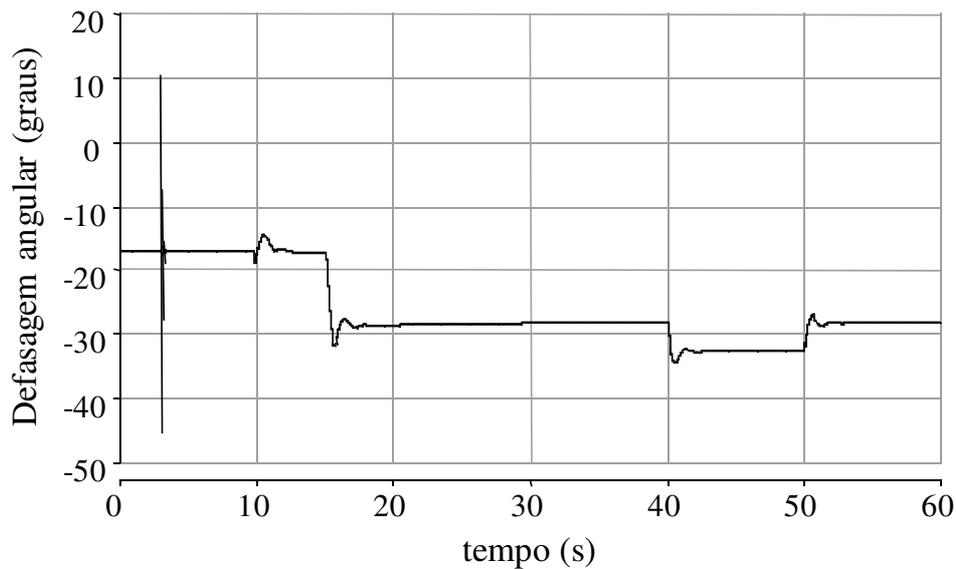


Figura 3-16: Conexão síncrona (caso 2) – Defasagem angular  $\theta_{VFT}$  (graus).

A Figura 3-17 apresenta a velocidade do rotor do VFT para as condições analisadas. Observam-se pequenas variações na velocidade do rotor quando do desligamento e religamento da interligação em corrente alternada.

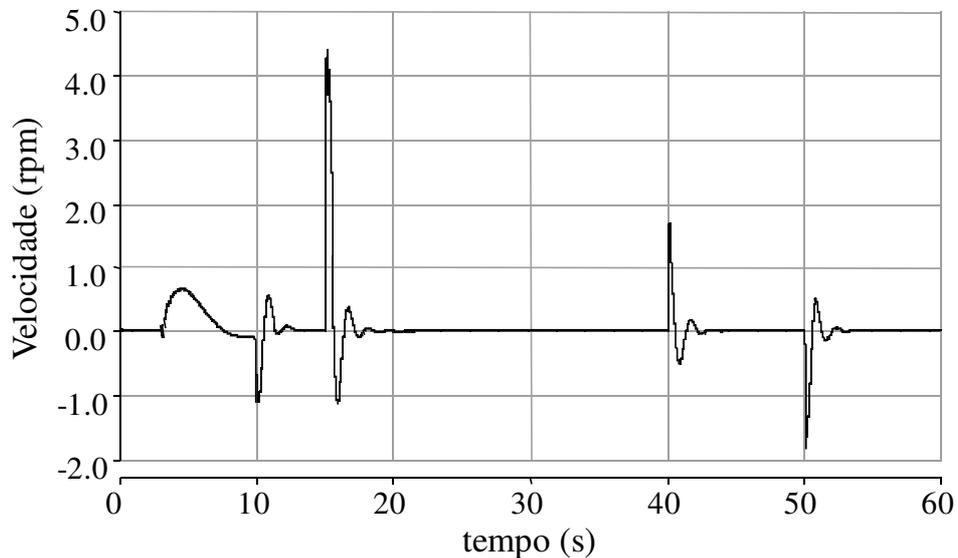


Figura 3-17: Conexão síncrona (caso 2) – Velocidade do rotor do VFT (em rpm).

A Figura 3-18 apresenta o valor eficaz das tensões nos sistemas 1 ( $V_{SIS1}$ ) e 2 ( $V_{SIS2}$ ), medidas nos terminais do VFT. Observa-se que a modificação do fluxo de potência na interligação CA conduz a variações de tensão nos sistemas envolvidos.

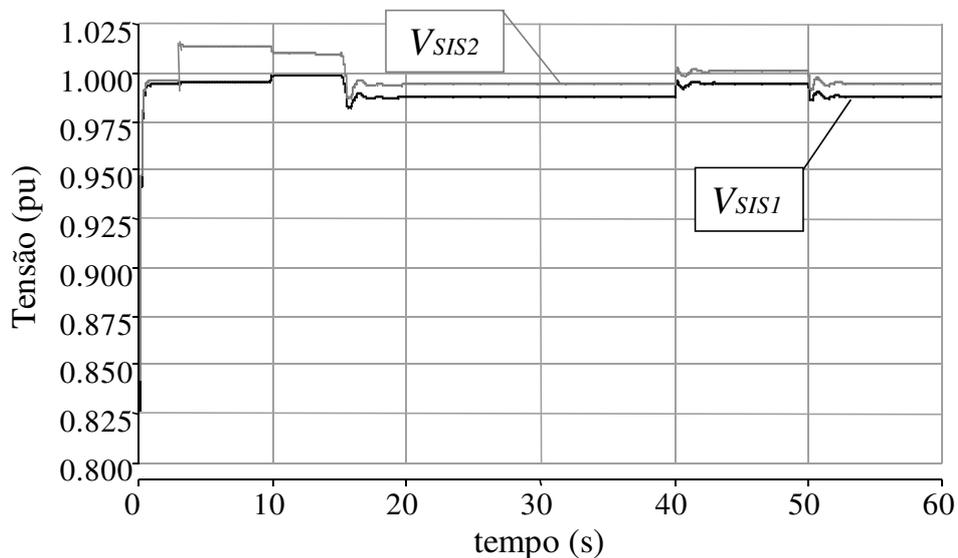


Figura 3-18: Conexão síncrona (caso 2) – Valor eficaz das tensões no sistema.

### 3.3 DESEMPENHO DO VFT NA CONEXÃO DE SISTEMAS ASSÍNCRONOS

As simulações apresentadas nesta seção consideram a conexão com o VFT de dois sistemas assíncronos, ou seja, sem qualquer conexão em corrente alternada. A Figura 3-19 ilustra a configuração utilizada na análise do desempenho do VFT, na interligação de dois sistemas assíncronos de mesma frequência nominal (60 Hz).

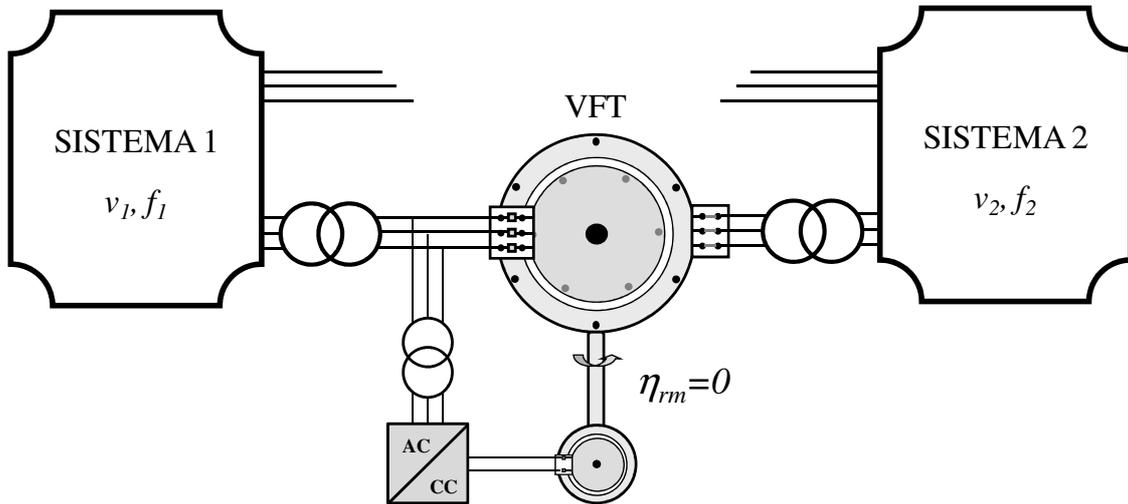


Figura 3-19: Interligação de sistemas assíncronos com o VFT.

#### 3.3.1 DEGRAU NA REFERÊNCIA DE POTÊNCIA DO VFT (CASO 3)

As seguintes premissas foram consideradas nas simulações apresentadas nesta seção:

- A simulação é realizada em uma janela de tempo de 60s. Os primeiros 15s são utilizados para energização e sincronismo do VFT;
- A frequência nos sistemas equivalentes não varia no tempo;
- Foram aplicados os seguintes degraus na referência de potência do VFT: (i) de zero para 100 MW ( $t=15$  s), (ii) de 100 MW para zero ( $t=25$  s), (iii) de zero para -50 MW ( $t=30$  s) e (iv) de -50 MW para zero ( $t=40$  s).

A Figura 3-20 apresenta o sinal de referência de potência ( $P_{REF}$ ) e a potência ativa medida no VFT ( $P_{VFT}$ ). Observa-se que o sinal de referência varia entre 100 e -50 MW, assumindo também valores nulos. O fluxo de potência no VFT segue corretamente as referências de potência, apresentando amortecimento satisfatório das oscilações do rotor do VFT.

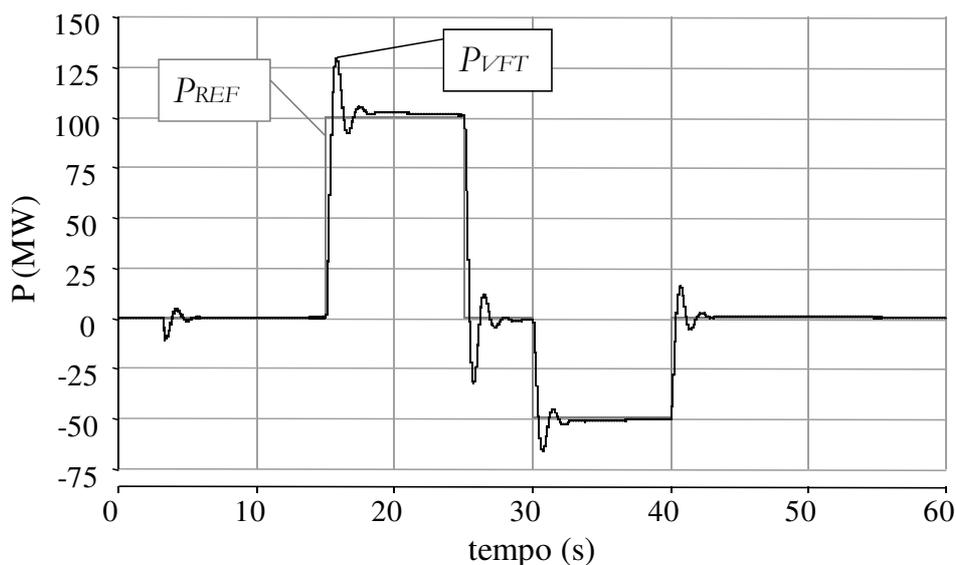


Figura 3-20: Conexão assíncrona (caso 3) – Sinal de referência e potência ativa.

Observa-se na Figura 3-20 pequena variação de potência entre os instantes 3 e 4 s, decorrentes da sincronização do VFT. A energização do VFT pelos terminais do estator (fechamento do disjuntor BRK<sub>2</sub>) foi feita no instante 3 s; o fechamento do disjuntor BRK<sub>1</sub>, interligando os sistemas 1 e 2, foi feito no instante 3,2 s após liberação da lógica de sincronismo.

A Figura 3-21 apresenta a defasagem angular  $\theta_{VFT}$  imposta pelo VFT. Para as condições analisadas, a defasagem angular no VFT assume valores na faixa de -30 a +15 graus elétricos. O valor de defasagem angular estabilizado de -23 graus corresponde à transferência de 100 MW do sistema 1 para o sistema 2; a defasagem de +11,5 graus corresponde à transferência de 50 MW do sistema 2 para o sistema 1. No período em que a transferência de energia é nula é zero a defasagem angular imposta pelo VFT.

A Figura 3-22 apresenta a potência mecânica entregue ou recebida do VFT pelo sistema de acionamento. Observa-se que a troca de energia entre a MIDA e o sistema de acionamento ocorre nos instantes em que mudam a referência de potência e a defasagem angular. A potência mecânica assume valores máximos de 0,9 MW, quando se considera a troca de referência de potência de zero para 100 MW (t=15 segundos).

Nos períodos em que o fluxo de potência no VFT estabiliza-se, a energia trocada entre a MIDA e o sistema de acionamento é nula. Este comportamento está coerente com as equações apresentadas no Capítulo 2.

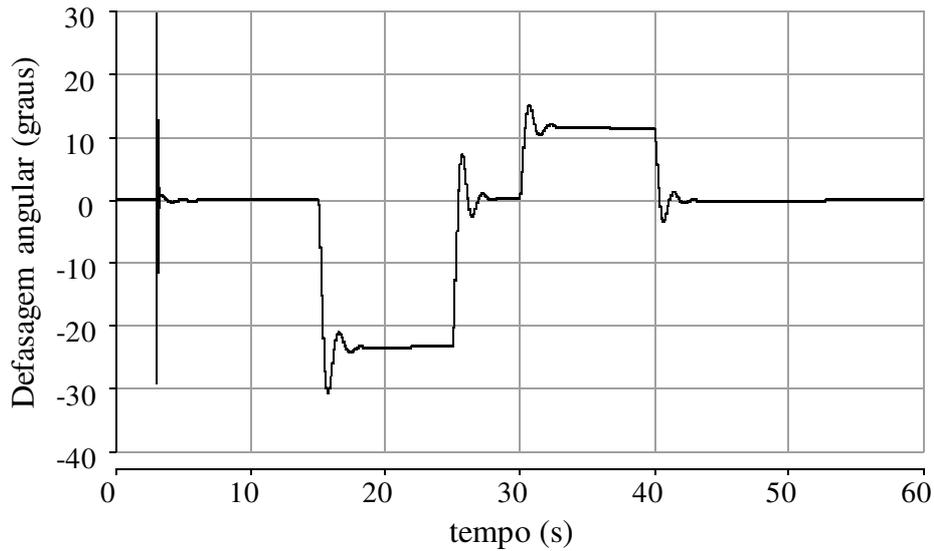


Figura 3-21: Conexão assíncrona (caso 3) – Defasagem angular  $\theta_{VFT}$  (graus).

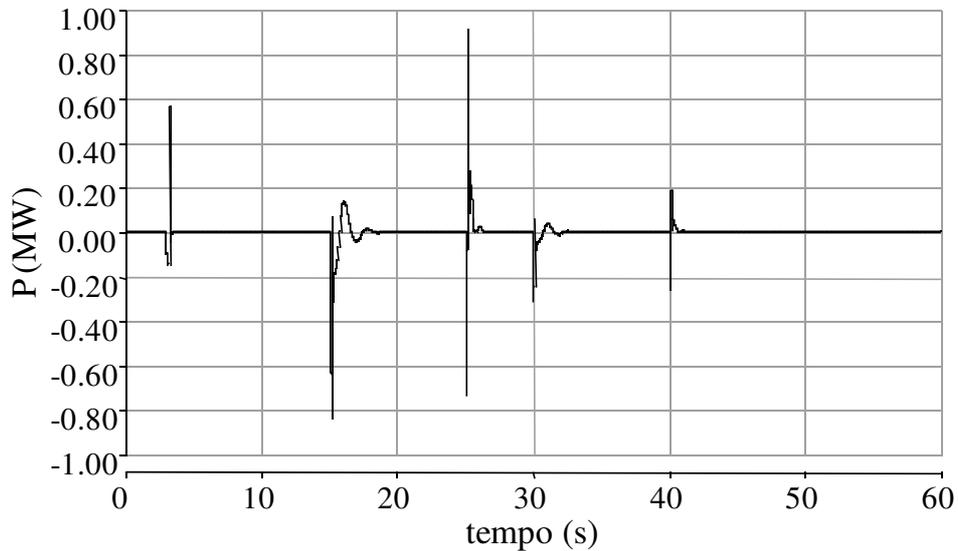


Figura 3-22: Conexão assíncrona (caso 3) – Potência mecânica no eixo do VFT.

A Figura 3-23 apresenta a velocidade do VFT para as condições analisadas. Ressalta-se que a velocidade é nula nos períodos em que o VFT transfere energia de forma estável. Este comportamento está coerente com as equações apresentadas no Capítulo 2, pois embora a conexão seja assíncrona, não foram considerados desvios de frequências entre os sistemas neste caso.

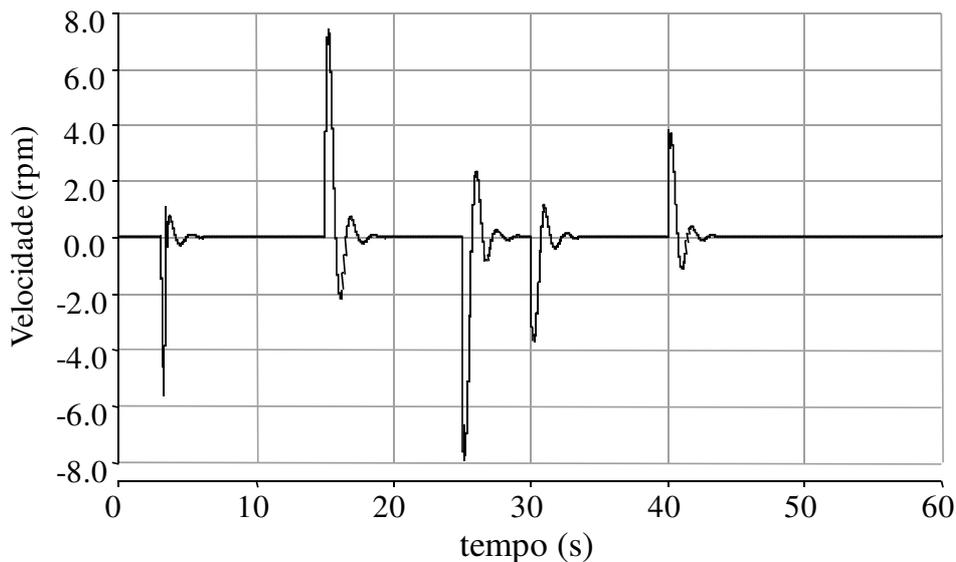


Figura 3-23: Conexão assíncrona (caso 3) – Velocidade do rotor do VFT (em rpm).

A Figura 3-24 apresenta o torque aplicado ao eixo do VFT pelo sistema de acionamento. A Figura 3-25 apresenta o detalhamento da mesma grandeza, considerando a janela de simulação de 15 a 15,5 s. Ressalta-se que não foram representados limitadores para o sinal de torque gerado pelo controlador, razão pela qual o torque  $T_D$  assume valores entre -3 e +3 pu. Nas demais simulações, apresentadas nos capítulos subsequentes, as limitações do sinal de referência de torque foram devidamente consideradas.

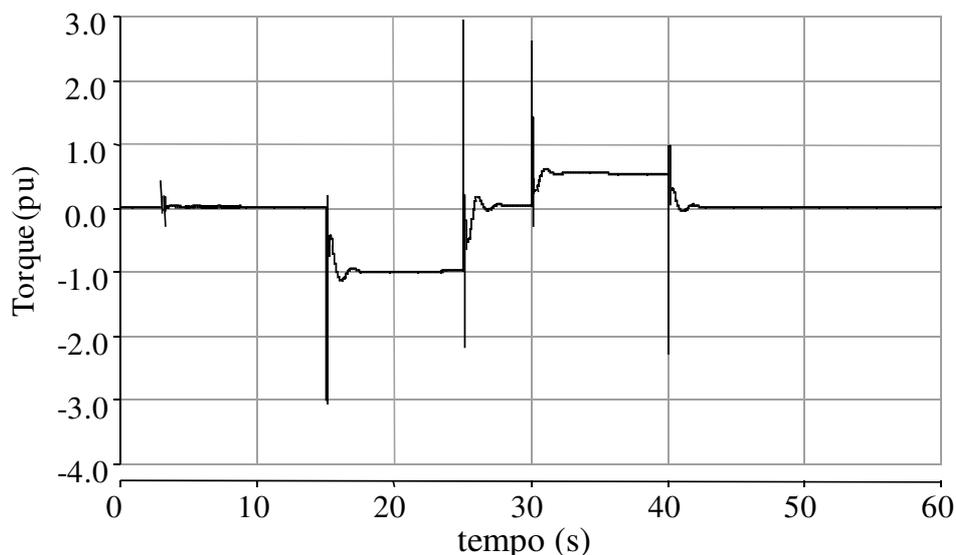


Figura 3-24: Conexão assíncrona (caso 3) – Torque  $T_D$  aplicado ao eixo do VFT (pu).

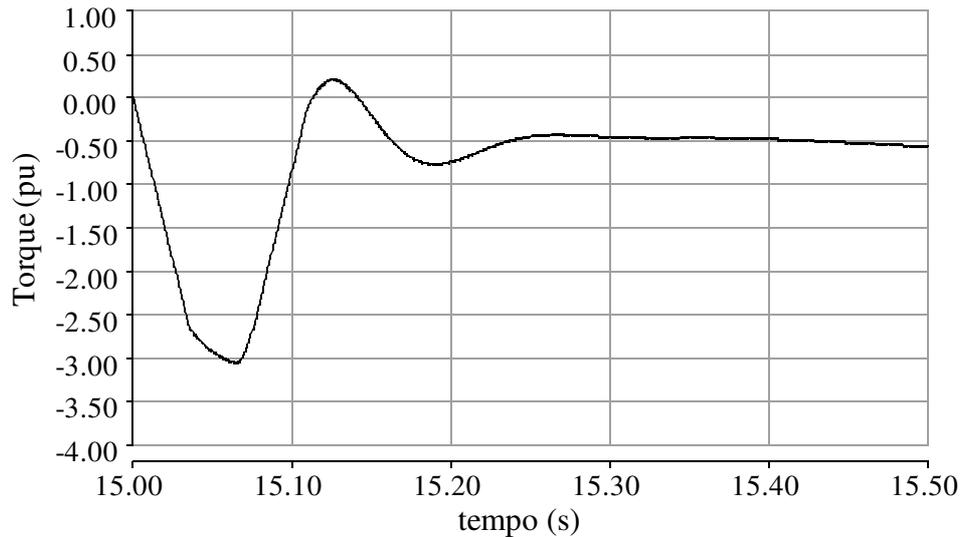


Figura 3-25: Conexão assíncrona (caso 3) – Torque  $T_D$  aplicado ao eixo do VFT.

É importante observar que a aplicação de torque no eixo da MIDA ocorre sempre que há fluxo de potência no VFT, mesmo nos períodos em que a velocidade do rotor é nula. Embora exista torque aplicado no eixo do VFT, a energia trocada entre o sistema de acionamento e o eixo do VFT é aproximadamente nula nos períodos em que a velocidade do VFT é zero. De fato, a potência mecânica é função do torque aplicado, mas também da velocidade de rotação da máquina.

A Figura 3-26 apresenta as tensões nas fases *a*, *b* e *c* da barra de 17 kV do sistema 2. Observa-se que o sistema apresenta-se perfeitamente equilibrado, indicando ausência de distorção harmônica de tensão.

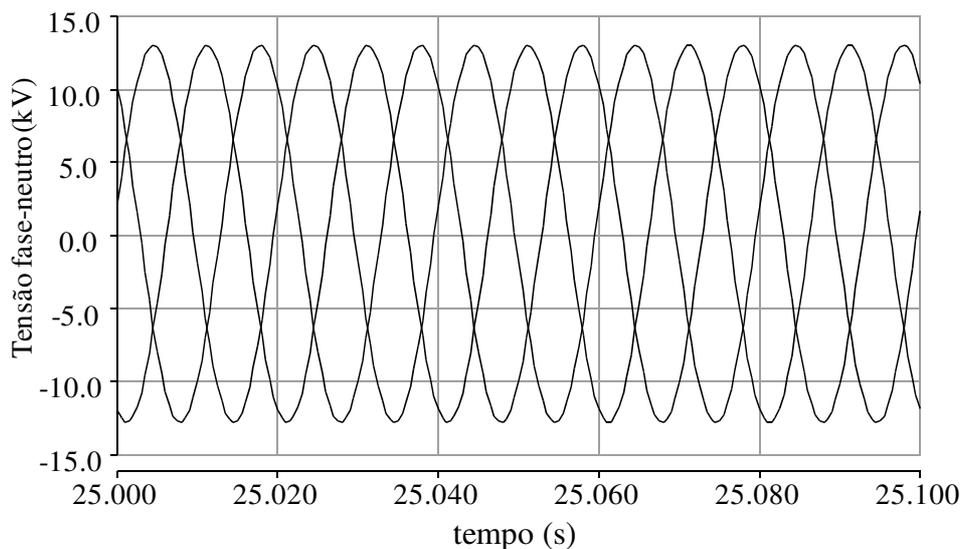


Figura 3-26: Conexão assíncrona (caso 3) – Tensões no sistema 2 (em kV).

A Figura 3-27 apresenta a corrente no enrolamento da fase *a* do rotor do VFT. Observa-se que após o fechamento do VFT flui corrente de magnetização da máquina. Ressalta-se que o VFT apresenta corrente de magnetização típica de uma máquina de indução (cerca de 20% da corrente nominal), o que difere bastante de um transformador defasador convencional. Na figura, a corrente no rotor chega a valores da ordem de 5 kA nos períodos em que o VFT transfere potência máxima (100 MW).

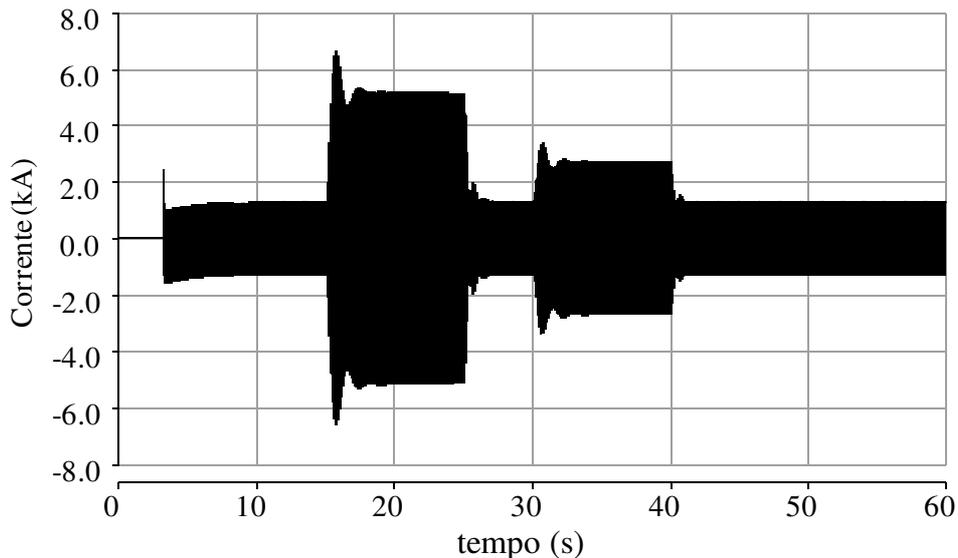


Figura 3-27: Conexão assíncrona (caso 3) – Corrente no rotor do VFT (em kA).

### 3.3.2 DEGRAU NA REFERÊNCIA DE POTÊNCIA DO VFT (CASO 4)

As seguintes premissas foram consideradas nas simulações apresentadas nesta seção:

- A frequência nos sistemas equivalentes não varia no tempo;
- Foi aplicado um degrau na referência de potência do VFT, de zero para 100 MW ( $t=15$  s);
- Para evidenciar os efeitos da inserção dos bancos de capacitores no perfil de tensão, os níveis de curto-circuito trifásico nos sistemas 1 e 2 foram reduzidos para 400 e 350 MVA, respectivamente.

A Figura 3-26 apresenta a referência de potência ( $P_{REF}$ ) e a potência medida no VFT ( $P_{VFT}$ ). Observam-se variações transitórias de potência quando da conexão dos bancos de capacitores (instantes  $t=40$  e  $t=50$  s), sempre inferiores a 5 MW.

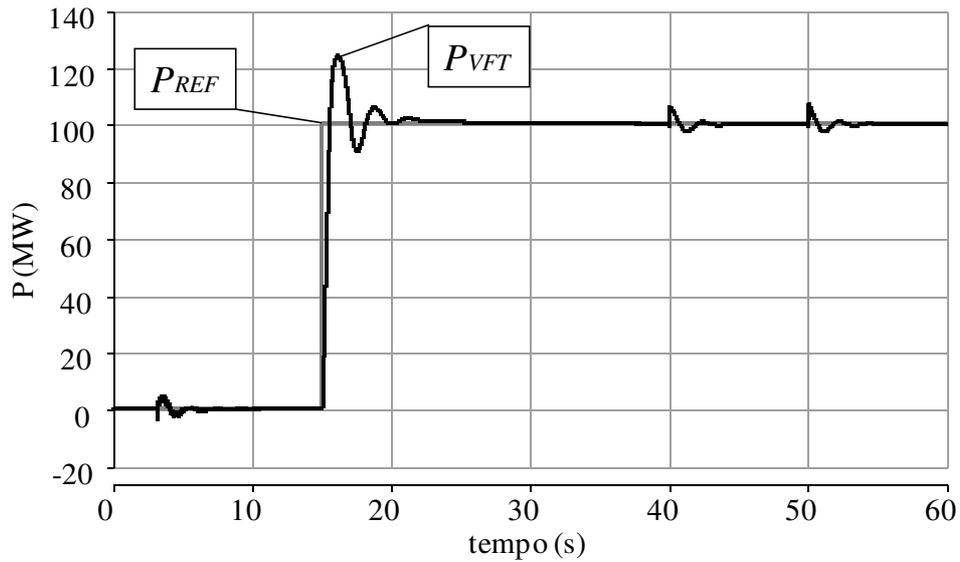


Figura 3-28: Conexão assíncrona (caso 4) – Sinal de referência e potência ativa.

A Figura 3-29 apresenta a defasagem angular  $\theta_{VFT}$  imposta pelo VFT. Observa-se que a melhoria do perfil de tensão, verificada após a conexão dos bancos de capacitores ( $t=40$  e  $t=50$  segundos), conduz a uma ligeira redução da defasagem angular (5 graus para a inserção de dois bancos de 25 Mvar), para uma mesma potência transferida.

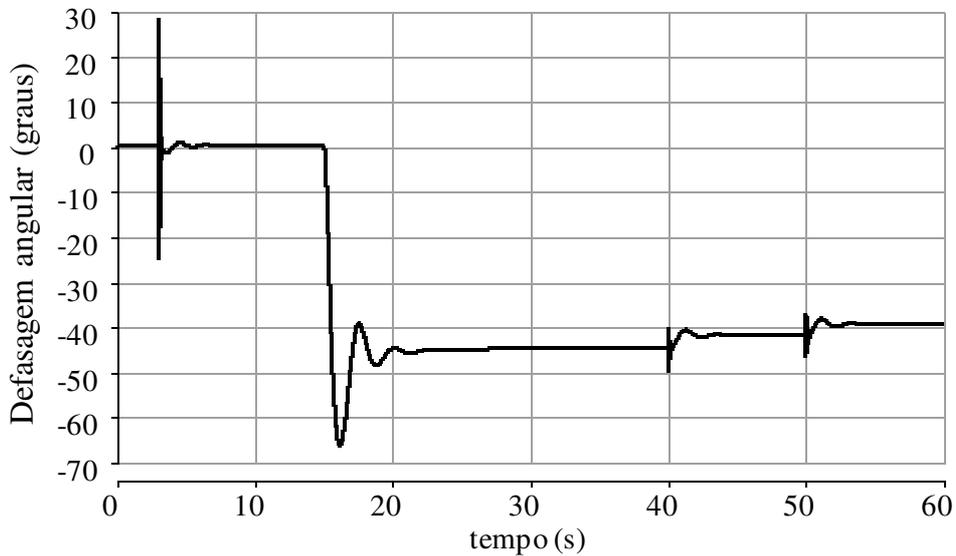


Figura 3-29: Conexão assíncrona (caso 4) – Defasagem angular  $\theta_{VFT}$  (graus).

A Figura 3-30 apresenta a velocidade do rotor do VFT para as condições analisadas. Como esperado, a conexão dos bancos de capacitores não impõe variações significativas na velocidade do rotor do VFT.

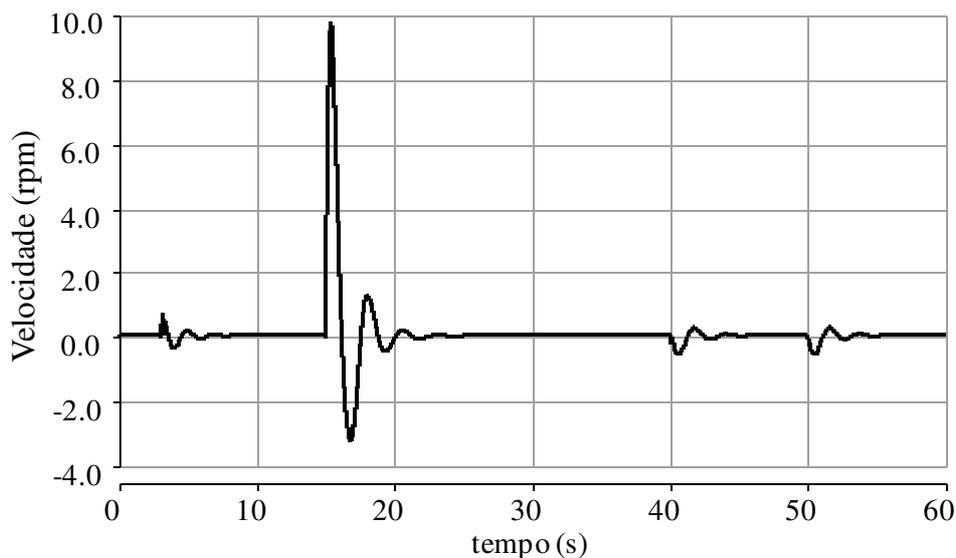


Figura 3-30: Conexão assíncrona (caso 4) – Velocidade do rotor do VFT (em rpm).

A Figura 3-31 apresenta o valor eficaz das tensões dos sistemas 1 ( $V_{SIS1}$ ) e 2 ( $V_{SIS2}$ ), nos terminais do VFT. Em função do reduzido nível de potência de curto-circuito considerado neste caso, a elevação de potência no VFT, de zero para 100 MW (em  $t=15$  s), provoca redução expressiva dos níveis de tensão (11%). Com a inserção dos bancos de capacitores (em  $t=40$  e  $t=50$  s) de 25 Mvar, obtém-se elevação no perfil de tensão de cerca de 5% por banco.

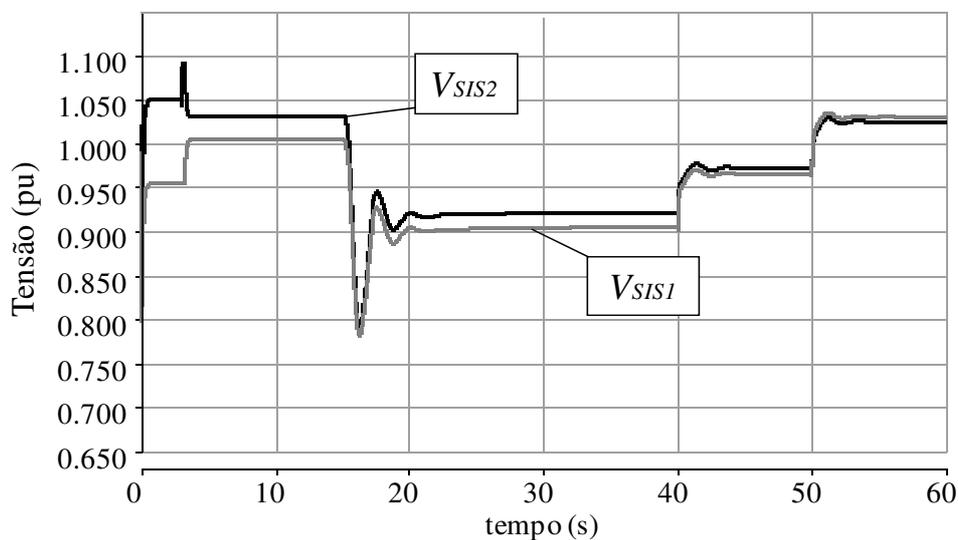


Figura 3-31: Conexão assíncrona (caso 4) – Valor eficaz da tensão nos sistemas 1 e 2 (em pu).

### 3.3.3 DEGRAU NA REFERÊNCIA DE POTÊNCIA DO VFT (CASO 5)

As seguintes premissas foram consideradas nas simulações apresentadas nesta seção:

- A simulação é realizada em uma janela de tempo de 60s. Os primeiros 15s são utilizados para energização e sincronismo;
- A frequência no sistema 1 é considerada constante durante toda a simulação; no sistema 2 considera-se que a frequência varia de forma senoidal.

A Figura 3-32 apresenta a referência de potência ( $P_{REF}$ ) e a potência medida no VFT ( $P_{VFT}$ ). Observa-se que o sinal de referência varia entre 100 e -50 MW, assumindo também valores nulos. O fluxo de potência no VFT segue as referências de potência e apresenta comportamento transitório satisfatório, mesmo considerando o desvio de frequência entre os sistemas.

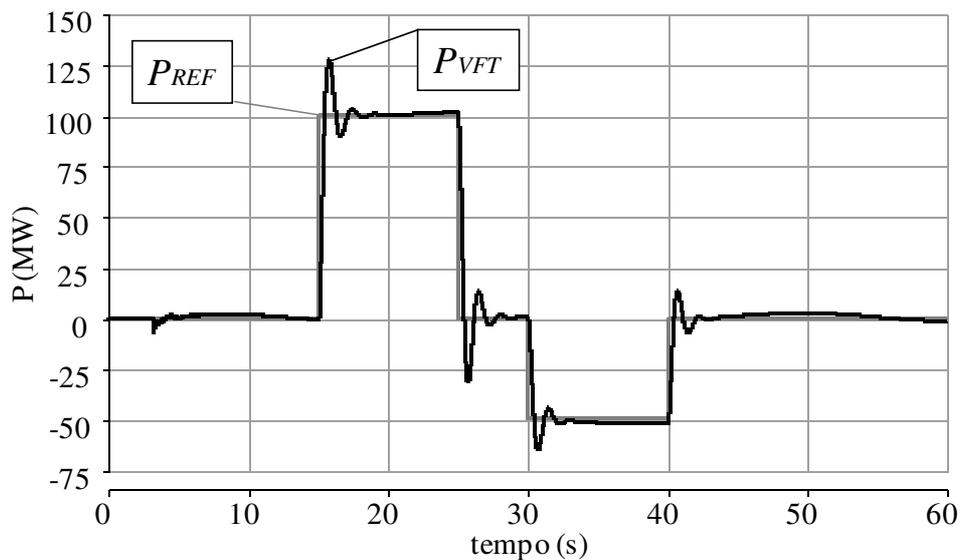


Figura 3-32: Conexão assíncrona (caso 5) – Sinal de referência e potência ativa.

A Figura 3-33 apresenta a defasagem angular  $\theta_{VFT}$  imposta pelo VFT. Observa-se que a defasagem angular compensa os desvios de frequência verificados entre os sistemas. Nesta condição de operação assíncrona com desvio de frequência, a defasagem angular varia mesmo no período em que o VFT transfere energia de forma estável.

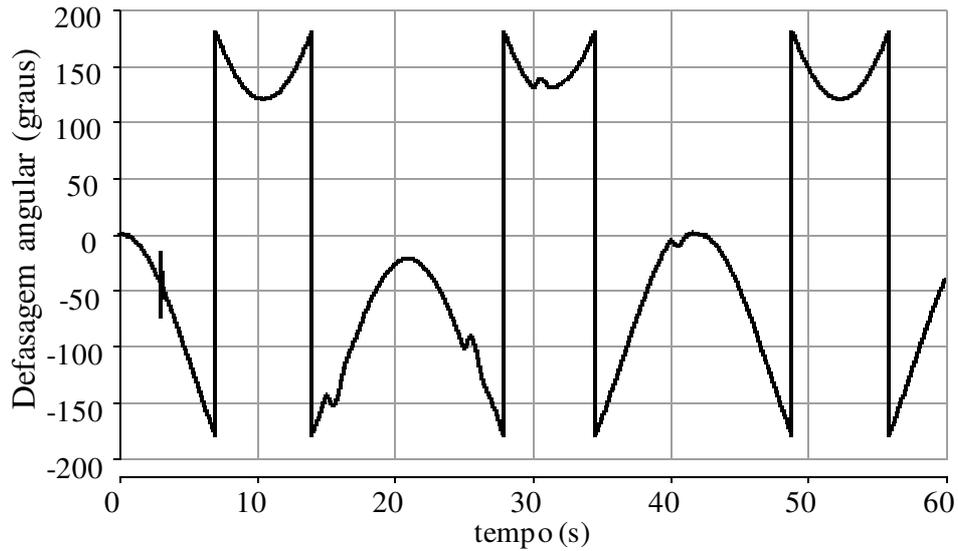


Figura 3-33: Conexão assíncrona (caso 5) – Defasagem angular no VFT (graus).

A Figura 3-34 apresenta a potência mecânica no eixo do VFT. Em função dos desvios de frequência entre os sistemas, observa-se troca de energia entre a MIDA e o sistema de acionamento. Este comportamento está coerente com as equações apresentadas no Capítulo 2, para operação assíncrona com desvio de frequência entre os sistemas.

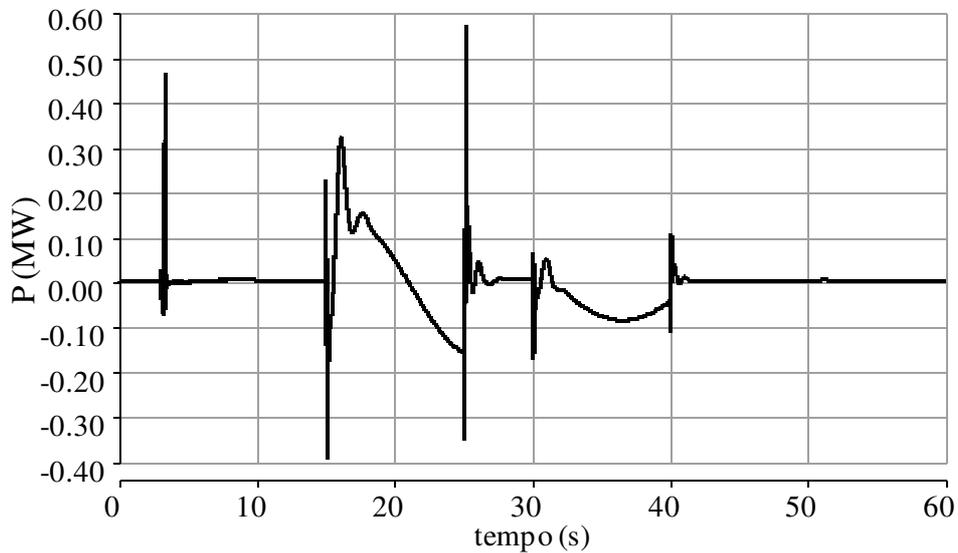


Figura 3-34: Conexão assíncrona (caso 5) – Potência mecânica no eixo do VFT.

A Figura 3-35 apresenta a velocidade do rotor do VFT para as condições analisadas. Observa-se que a velocidade do rotor varia de forma a compensar o desvio de frequência entre os sistemas.

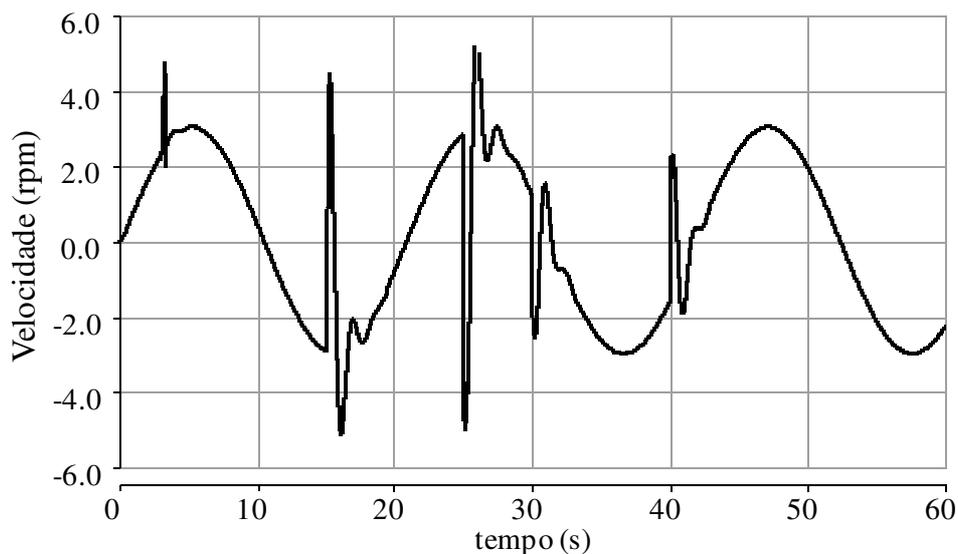


Figura 3-35: Conexão assíncrona (caso 5) – Velocidade do rotor do VFT (em rpm).

### 3.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou um modelo digital para o VFT desenvolvido para simulação de transitórios eletromagnéticos no programa PSCAD/EMTDC. Através de simulações com o modelo desenvolvido, foram demonstrados os aspectos fundamentais do funcionamento do VFT, em regime permanente e transitório.

O modelo do VFT para PSCAD/EMTDC desenvolvido e apresentado neste capítulo está baseado nas características reais de equipamentos instalados no campo. Desta forma, o modelo permite validar as análises apresentados nos demais capítulos, que abordam aspectos de controle do equipamento e do desenvolvimento do modelo para programas de transitórios eletromecânicos.

## 4 OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DINÂMICO DO VFT

Este capítulo apresenta uma proposta de sistema de controle para o VFT, baseada em controlador proporcional-integral com sinal estabilizador derivado da velocidade do rotor da máquina. A proposição da estrutura do controlador, bem com a otimização do seu desempenho, foi realizada através da análise do modelo linearizado de sistemas elétricos genéricos interligados pelo VFT. Os resultados obtidos foram validados através de simulações com o modelo completo do VFT, desenvolvido no programa de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC.

O texto está dividido em três seções principais. Na primeira seção apresenta-se o modelo linear desenvolvido e a resposta dinâmica do mesmo para diferentes estruturas de controle. A validação dos resultados é apresentada na segunda seção, através da comparação com resultados obtidos com o modelo mais completo (PSCAD/EMTDC). Na última seção apresenta-se uma proposta de estrutura de controlador para o VFT, bem como as faixas de ajustes para seus parâmetros principais.

### 4.1 MODELO LINEAR DO VFT E REDE ELÉTRICA

Esta seção apresenta uma proposta de modelo linear para o VFT, quando utilizado na interligação de dois sistemas elétricos genéricos. O objetivo é dispor de um modelo matemático mais simples que reproduza, de forma expedita, o desempenho dinâmico do VFT quando da interligação de sistemas elétricos típicos.

A seção apresenta, ainda, a resposta dinâmica do modelo linear considerando diferentes estruturas e ajustes para o controlador do VFT. As análises apresentadas têm como foco a otimização do desempenho dinâmico do VFT.

#### 4.1.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO SISTEMA MODELADO

A Figura 4-1 apresenta um diagrama esquemático da rede elétrica considerada para desenvolvimento do modelo linear. A rede elétrica é representada por dois sistemas equivalentes, de reatâncias de curto-circuito  $X_{EQ1}$  e  $X_{EQ2}$ , e por transformadores elevadores de reatâncias de dispersão  $X_{TR1}$  e  $X_{TR2}$ . A máquina rotativa do VFT é representada por suas reatâncias de dispersão  $X_{VFT}$  e magnetização  $X_{MAG-VFT}$  e pela defasagem angular  $\theta_{VFT}$  imposta pelo dispositivo. A figura destaca a potência

ativa  $P_{VFT}$  que flui pela interligação entre os dois sistemas, através do entreferro da máquina rotativa do VFT. Considera-se que os sistemas operam à mesma frequência, ou seja, com rotor parado e com toda potência fluindo do estator para o rotor (potência mecânica nula). As tensões  $E_1$  e  $E_2$  representam as tensões internas dos sistemas equivalentes 1 e 2, respectivamente.

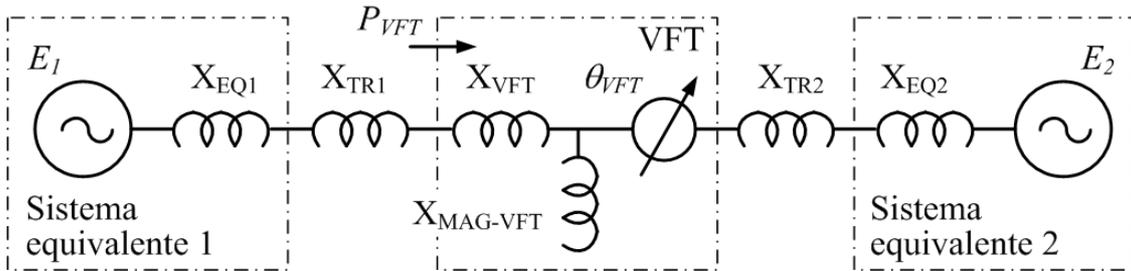


Figura 4-1: Modelo da rede elétrica e da máquina principal do VFT.

A Figura 4-2 apresenta um controlador genérico  $H(s)$ , que tem como entrada o sinal de erro  $(P_{REF} - P_{VFT})$ , constituído pela diferença entre o valor de potência ativa que é solicitado pelo operador e a potência ativa efetivamente medida na interligação (no VFT). A saída do controlador é o torque  $T_D$  a ser aplicado no eixo do VFT através do sistema de acionamento, de forma a produzir a necessária defasagem angular entre os campos do rotor e estator da máquina rotativa do VFT. Sob o ponto de vista do comportamento dinâmico, o rotor do VFT está representado pela sua constante de inércia  $H$  e constante de amortecimento  $D$ . Como resultado determina-se a velocidade  $\omega_m$  do rotor do VFT e a defasagem angular  $\theta_{VFT}$  a ser considerada no modelo de VFT apresentado na Figura 4-1. Registre-se que a inércia da máquina auxiliar para aplicação de torque, que encontra-se acoplada mecanicamente ao eixo do VFT, está considerada no valor  $H$  referente à inércia total do dispositivo. Na figura,  $\omega_0$  é a velocidade síncrona, medida em radianos por segundo.

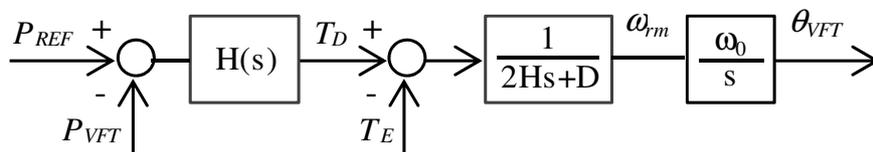


Figura 4-2: Sistema de controle e representação da dinâmica do rotor do VFT.

Para a obtenção do modelo linear simplificado considerou-se que a compensação reativa capacitiva anula o efeito da corrente de magnetização do VFT. Esta aproximação apoia-se no fato de que é baixa a dependência do fluxo de potência ativa na rede elétrica com a tensão, em condições normais de operação. Com efeito, o

objetivo principal do VFT é o controle do fluxo de potência ativa na interligação, razão pela qual o ramo de magnetização não será considerado no modelo linear aqui apresentado.

Considera-se, ainda, que  $\theta_{VFT}$  é um ângulo pequeno tal que a rede elétrica apresenta comportamento aproximadamente linear, ou seja,  $\sin \theta_{VFT} \cong \theta_{VFT}$ , em radianos. Esta aproximação facilita o desenvolvimento do modelo matemático e é aceitável para valores de defasagem angular reduzidos na rede elétrica. Para  $\theta_{VFT}$  igual a 20 graus, por exemplo, o erro que decorre desta aproximação é da ordem de 2%. Conforme será abordado no Capítulo 5, a operação do VFT é realizada com defasagens angulares relativamente baixas, para garantir a sua operação estável, em regime permanente e dinâmico.

Por conveniência, considera-se que a defasagem angular entre as tensões internas dos sistemas equivalentes é igual a zero e que a magnitude dessas tensões é igual a 1 pu. Desprezando-se as perdas ôhmicas da rede e do VFT e considerando as aproximações anteriormente apresentadas, a potência elétrica  $P_{VFT}$  que flui na interligação pode ser aproximada pela seguinte expressão:

$$P_{VFT} = \frac{1}{X_{EQ1} + X_{TR1} + X_{VFT} + X_{TR2} + X_{EQ2}} \theta_{VFT} = \frac{\theta_{VFT}}{X_T} \quad (62)$$

A reatância total  $X_T$  indicada em (62) é o resultado do somatório das reatâncias série entre os dois sistemas equivalentes:  $X_{EQ1}$ ,  $X_{EQ2}$ ,  $X_{TR1}$ ,  $X_{TR2}$  e  $X_{VFT}$ .

Para fins deste modelo, o torque eletromagnético  $T_E$  (em pu) produzido pela interação dos campos de estator e rotor da máquina rotativa, pode ser aproximado pela potência ativa que flui pelo VFT ( $P_{VFT}$ , em pu). Conforme apresentado no Capítulo 2, fica evidente em (51) que essa aproximação pode ser feita caso sejam desprezados os desvios de frequência nos sistemas conectados ao estator e rotor da MIDA.

#### 4.1.2 PARÂMETROS DO SISTEMA ANALISADO

A Tabela 4-1 apresenta os parâmetros do sistema analisado, incluindo a rede elétrica (sistemas equivalentes) e o próprio VFT. Os parâmetros do VFT foram obtidos em [4] e referem-se ao dispositivo instalado em Langlois, com exceção da constante de amortecimento  $D$ , para a qual foi utilizado um valor típico.

Tabela 4-1: Parâmetros da rede elétrica e do VFT (valores em % na base 100 MVA)

SISTEMAS ELÉTRICOS EQUIVALENTES 1 E 2	
Parâmetro	Valor
Nível de curto-circuito trifásico	2.500 MVA
Reatâncias internas às fontes $X_{EQ1}$ e $X_{EQ2}$	4%
Frequência nominal	60 Hz
VFT	
Parâmetro	Valor
Potência nominal dos transformadores (230/17 kV)	100 MVA
Reatâncias de dispersão $X_{TR1}$ e $X_{TR2}$ (transformadores)	10%
Potência nominal da máquina rotativa do VFT	100 MVA
Reatância de dispersão do VFT (máquina rotativa)	12%
Constante de inércia H (inércia total)	26 s
Constante de amortecimento D	1 pu/pu
Frequência angular nominal $\omega_0$	$2\pi 60$ rad/s

#### 4.1.3 MODELO DA REDE ELÉTRICA E DO VFT OPERANDO EM MALHA ABERTA

A Figura 4-3 apresenta o diagrama de blocos que representa o VFT e os sistemas equivalentes, considerando o sistema operando em malha aberta, ou seja, sem controle da potência ativa na interligação. Na figura,  $X_T$  representa a reatância total do sistema e inclui as reatâncias  $X_{EQ1}$ ,  $X_{EQ2}$ ,  $X_{TR1}$ ,  $X_{TR2}$  e  $X_{VFT}$ . A potência  $P_{VFT}$  é obtida linearmente a partir da defasagem angular  $\theta_{VFT}$  imposta pelo VFT, considerando a relação aproximada apresentada em (62). Conforme abordado anteriormente, para fins deste modelo, o torque eletromagnético  $T_E$  (em pu) é aproximado pela potência  $P_{VFT}$  (em pu), com  $k_c=1$ .

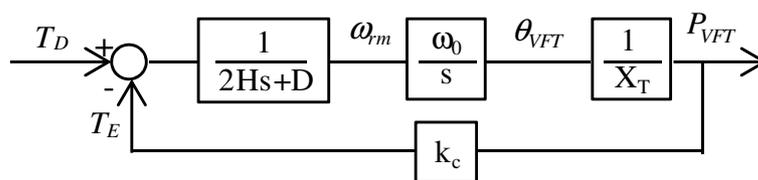


Figura 4-3: Diagrama de blocos para sistema em malha aberta.

Partindo do diagrama de blocos apresentado na Figura 4-3, a função de transferência  $P_{VFT}(s) / T_D(s)$  para operação em malha aberta é dada por:

$$\frac{P_{VFT}(s)}{T_D(s)} = \frac{\omega_0}{2HX_Ts^2 + DX_Ts + \omega_0} \quad (63)$$

Para o sistema indicado em (63) e considerando os parâmetros indicados na Tabela 4-1, são obtidos dois polos complexos:  $-0,0096 \pm 4,2573i$ . Observa-se que os polos apresentam parte real muito reduzida, indicando que o amortecimento do sistema é quase nulo nesta condição operativa. Para este caso, o amortecimento das oscilações do rotor do VFT depende quase que exclusivamente das características mecânicas do VFT (atrito viscoso), não havendo influência direta dos seus controles.

Deve-se registrar que esta característica do sistema em malha aberta modifica-se muito pouco com a alteração dos parâmetros da rede elétrica, sendo afetada quase que exclusivamente pela constante de amortecimento D (atrito viscoso). Assim, em face do reduzido atrito viscoso observado em máquinas rotativas de grande porte, como é o caso do VFT, a operação em malha aberta mostra-se inviável na prática.

Há que se considerar por outro lado, que o VFT apresenta – naturalmente e sem qualquer ação de controle – torques em fase com os desvios angulares, ou seja, torques de sincronismo. Esta característica, similar àquela observada em máquinas síncronas mesmo sem controle da excitação, está associada à tendência natural de alinhamento dos campos produzidos pelos enrolamentos do rotor e estator. Conforme abordado no Capítulo 2, na operação em regime permanente o torque de sincronismo no VFT assume seu valor máximo para  $\theta_{VTF}$  igual a zero. Para defasagem angular entre os campos de estator e rotor igual a noventa graus, o torque de sincronismo é nulo.

Como conclusão, verifica-se que a operação do VFT em malha aberta não é adequada. A aplicação de torque  $T_D$  no eixo do VFT, nestas condições, resultaria em oscilações do rotor e de potência ativa no VFT sem o amortecimento necessário, não obstante exista capacidade de manter em sincronismo os campos de rotor e estator.

#### 4.1.4 MODELO DA REDE ELÉTRICA E DO VFT, COM CONTROLADOR P

A Figura 4-4 apresenta o diagrama de blocos que representa o VFT e os sistemas equivalentes, considerando o sistema em malha fechada, com controle tipo proporcional de ganho  $k_p$ . Considerou-se o fechamento da malha através da comparação de um valor de referência de potência  $P_{REF}$  com o valor de potência ativa  $P_{VFT}$  medido na interligação. O torque eletromagnético  $T_E$  (em pu) produzido pelo VFT é aproximado pela potência  $P_{VFT}$  (em pu), com  $k_c=1$ .

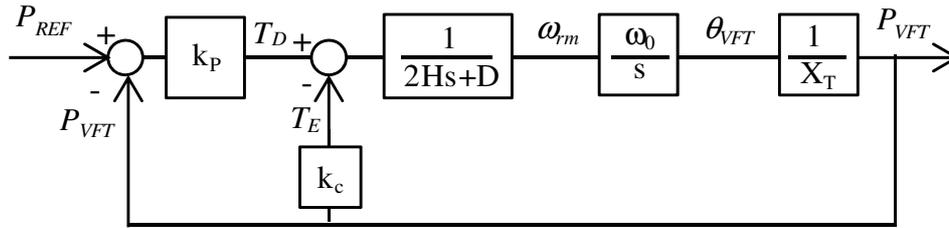


Figura 4-4: Diagrama de blocos para sistema com controle tipo proporcional.

Partindo do diagrama de blocos apresentado na Figura 4-4, a função de transferência  $P_{VFT}(s) / P_{REF}(s)$  para o sistema em malha fechada com controlador tipo proporcional é dada por:

$$\frac{P_{VFT}(s)}{P_{REF}(s)} = \frac{\omega_0 k_P}{2HX_T s^2 + DX_T s + \omega_0(1 + k_P)} \quad (64)$$

A Tabela 4-2 apresenta os polos da função de transferência apresentada em (64), considerando diferentes valores do ganho proporcional  $k_P$  e os parâmetros do sistema indicados na Tabela 4-1.

Tabela 4-2: Polos e amortecimento do sistema considerando controle proporcional

Ganho $k_P$	Polos		Amortecimento
	Parte real	Parte imaginária	$\xi$ (%)
0	-0,0096	$\pm 4,2573i$	0,23
10	-0,0096	$\pm 4,3133i$	0,22
50	-0,0096	$\pm 4,5308i$	0,21
100	-0,0096	$\pm 4,7888i$	0,20
1000	-0,0096	$\pm 8,1364i$	0,12

Observa-se na Tabela 4-2 que a parte real dos polos não sofre influência do aumento do ganho proporcional, indicando que o amortecimento do sistema é insuficiente para qualquer valor de ganho considerado. O efeito do aumento do ganho  $k_P$  é observado no aumento da parte imaginária do polo, ou seja, apenas na frequência de oscilação do sistema.

Deve-se registrar que este comportamento oscilatório do sistema modifica-se muito pouco com a alteração das características da rede elétrica (nível de curto-circuito trifásico, por exemplo). Assim, no caso da utilização de um controlador tipo proporcional para o sistema analisado, o amortecimento das oscilações do rotor do

VFT dependeria apenas de suas características mecânicas (atrito viscoso), da mesma forma que no caso da operação em malha aberta.

Como conclusão, verifica-se que a operação do VFT em malha fechada com controlador proporcional não é adequada em sistemas de potência.

#### 4.1.5 MODELO DA REDE ELÉTRICA E DO VFT, COM CONTROLADOR PI

A Figura 4-5 apresenta o diagrama de blocos que representa o VFT e os sistemas equivalentes, considerando o sistema operando em malha fechada, com controle tipo proporcional-integral de ganhos proporcional  $k_p$  e integral  $k_i$ . Da mesma forma que no caso anterior, a entrada do controlador é o erro de potência calculado através da diferença entre o valor de referência  $P_{REF}$  e o valor de potência ativa  $P_{VFT}$  medido na interligação. O torque eletromagnético  $T_E$  (em pu) produzido pelo VFT é aproximado pela potência  $P_{VFT}$  (em pu), com  $k_c=1$ .

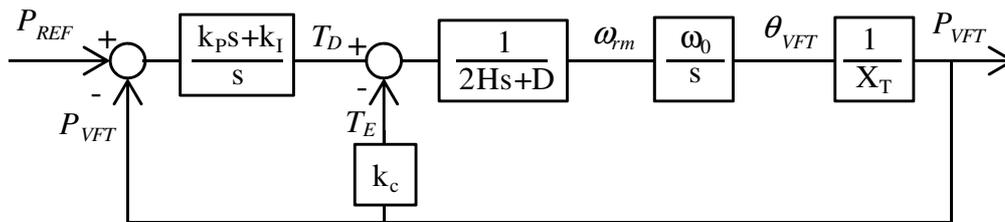


Figura 4-5: Diagrama de blocos para sistema com controle PI.

Partindo do diagrama de blocos apresentado na Figura 4-5, a função de transferência  $P_{VFT}(s) / P_{REF}(s)$  para o sistema em malha fechada com controlador tipo proporcional-integral é dada por:

$$\frac{P_{VFT}(s)}{P_{REF}(s)} = \frac{\omega_0(k_p s + k_i)}{2HX_T s^3 + DX_T s^2 + \omega_0(1 + k_p)s + \omega_0 k_i} \quad (65)$$

O desempenho dinâmico do sistema descrito em (65) foi analisado para diferentes combinações de ganhos  $k_p$  e  $k_i$ , considerando os parâmetros indicados na Tabela 4-1. Em nenhum dos casos foi possível obter desempenho satisfatório, no que se refere ao amortecimento das oscilações do rotor do VFT. Esse resultado está ilustrado na Figura 4-6 e na Figura 4-7, que apresentam os polos do sistema para diferentes valores de ganho  $k_p$  e  $k_i$ .

Observa-se na Figura 4-6 e na Figura 4-7 que, de uma forma geral, os polos estão no semiplano lateral direito, indicando que o sistema é instável. Por outro lado,

para os valores de ganho que estabilizam o sistema, verifica-se que a parte real dos polos correspondentes é muito reduzida, indicando que o amortecimento do sistema é insuficiente na prática.

Como conclusão, verifica-se que a operação do VFT em malha fechada com controlador PI também não é adequada, em face da insuficiência de amortecimento.

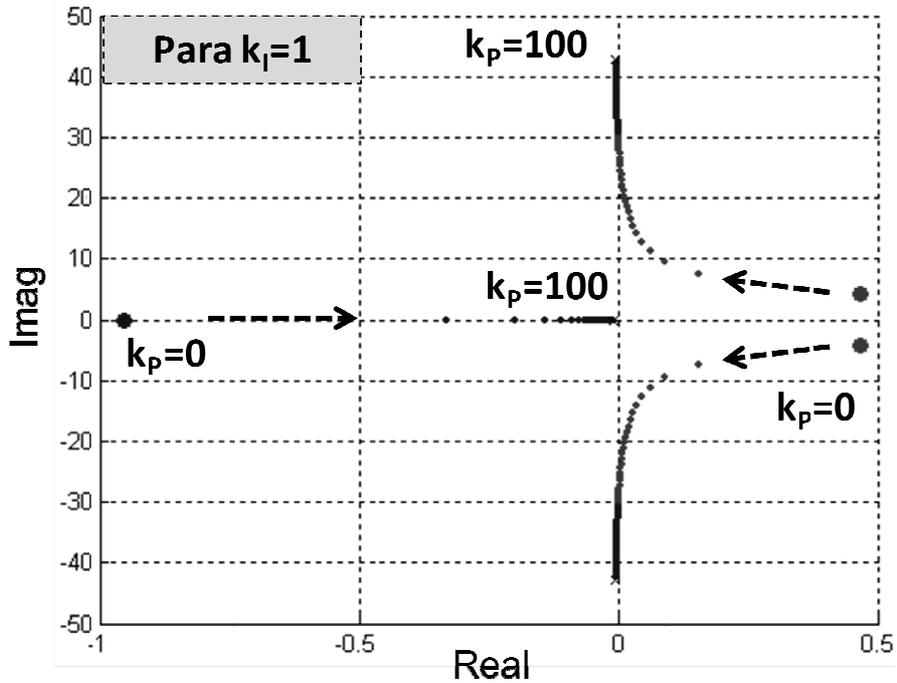


Figura 4-6: Polos do sistema, controlador PI,  $k_I = 1$  e  $k_P$  variando de 0 a 100.

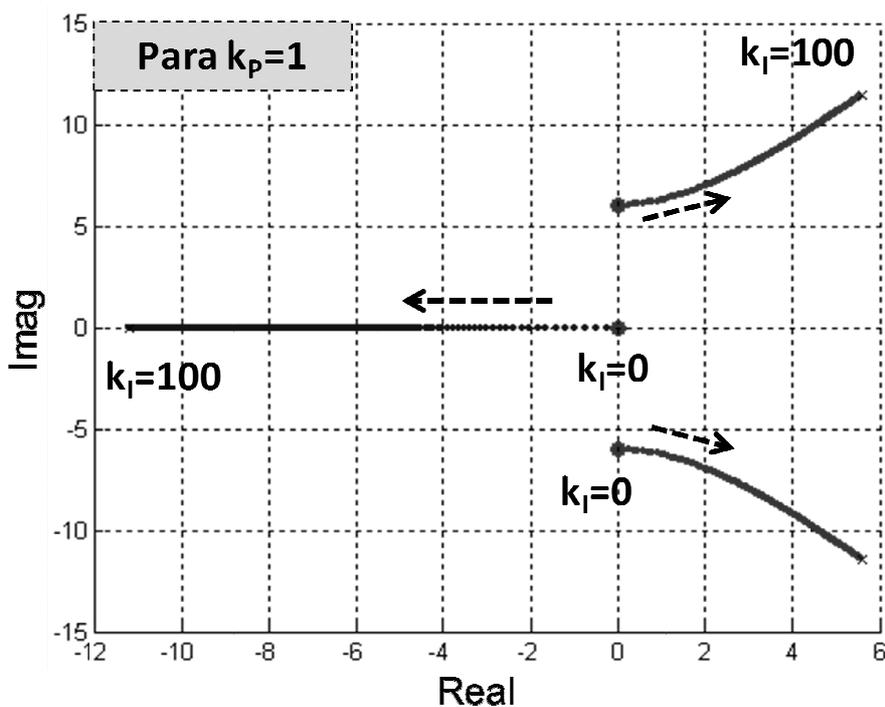


Figura 4-7: Polos do sistema, controlador PI,  $k_P = 1$  e  $k_I$  variando de 0 a 100.

A analogia do VFT com uma máquina síncrona indica que deve ser introduzido sinal estabilizador que produza uma referência de torque adicional em fase com os desvios da velocidade do rotor, conforme será apresentado a seguir.

#### 4.1.6 MODELO DA REDE ELÉTRICA E DO VFT, CONTROLE PI E ESTABILIZADOR

A Figura 4-7 apresenta o diagrama de blocos que representa o VFT e os sistemas equivalentes, considerando o sistema em malha fechada, com controle tipo PI e estabilizador de ganho  $k_{PSS}$  e filtro *washout* de constante de tempo  $T_w$ . O estabilizador utiliza a velocidade do VFT como sinal de entrada, com o objetivo de produzir torque suplementar em fase com os desvios de velocidade e proporcionar amortecimento às oscilações do rotor do VFT. O sinal de saída do estabilizador é utilizado para composição da referência final de torque  $T_D$  a ser aplicado no eixo do VFT, conforme apresentado no diagrama. O filtro *washout* é utilizado para determinação dos desvios da velocidade do rotor para os quais se deseja atuar. O torque eletromagnético  $T_E$  (em pu) é aproximado por  $P_{VFT}$  (em pu), com  $k_c=1$ .

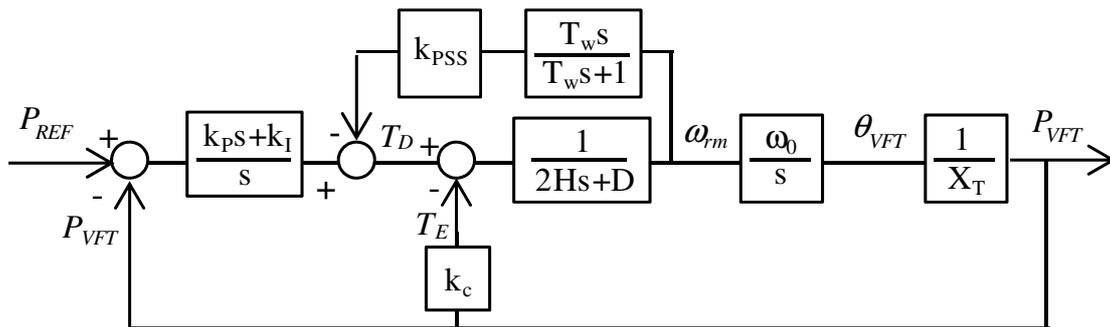


Figura 4-8: Diagrama de blocos para sistema com controle PI e sinal estabilizador.

Partindo do diagrama de blocos apresentado na Figura 4-8, a função de transferência  $P_{VFT}(s) / P_{REF}(s)$  para sistema em malha fechada com controlador PI e sinal estabilizador derivado do sinal de velocidade é dada por:

$$\frac{P_{VFT}(s)}{P_{REF}(s)} = \frac{\omega_0(T_w k_P s^2 + (k_P + T_w k_I)s + k_I)}{c_1 s^4 + c_2 s^3 + c_3 s^2 + c_4 s + c_5} \quad (66)$$

onde,

$$c_1 = 2HX_T T_w;$$

$$c_2 = (2H + T_w(D + k_{PSS}))X_T;$$

$$c_3 = DX_T + \omega_0 T_w(k_P + 1);$$

$$c_4 = \omega_0(k_P + 1 + T_w k_I); \quad c_5 = \omega_0 k_I.$$

A Tabela 4-3 apresenta os polos e o amortecimento do sistema descrito em (66), considerando diferentes valores para os ganhos  $k_{PSS}$ ,  $k_I$  e  $k_P$ . Os parâmetros do VFT e da rede elétrica considerados são aqueles indicados na Tabela 4-1.

Tabela 4-3: Polos e amortecimento do sistema considerando controle proporcional-integral e estabilizador

Casos	Ganhos	Desempenho	Polos		Amortecimento
			Real	Imaginário	$\xi$ (%)
1	$k_P=16$ $k_I=0$ $k_{PSS}=300$	Estável, com erro de regime permanente	-	-	-
			-2,8932	$\pm 17,2573$	16,5
			-0,3354	0	-
2	$k_P=16$ $k_I=100$ $k_{PSS}=300$	Instável	0,0597	$\pm 17,5185$	-0,3
			-5,9079	0	-
			-0,3332	0	-
3	$k_P=16$ $k_I=100$ $k_{PSS}=1000$	Estável, sem erro de regime permanente	-5,3053	$\pm 13,4869$	36,6
			-8,6398	0	-
			-0,3329	0	-
4	$k_P=16$ $k_I=10$ $k_{PSS}=300$	Estável, sem erro de regime permanente	-2,5942	$\pm 17,2149$	14,9
			-0,6028	0	-
			-0,3307	0	-
5	$k_P=16$ $k_I=10$ $k_{PSS}=1000$	Estável, sem erro de regime permanente	-9,3087	$\pm 14,2576$	54,7
			-0,6408	0	-
			-0,3252	0	-
6	$k_P=8,5$ $k_I=5,5$ $k_{PSS}=1000$	Estável, sem erro de regime permanente	-9,2929	$\pm 8,1900$	75,0
			-0,6782	0	-
			-0,3193	0	-
7	$k_P=8,5$ $k_I=5,5$ $k_{PSS}=300$	Estável, sem erro de RP, baixo amortecimento	-2,5941	$\pm 12,6656$	20,1
			-0,6050	0	-
			-0,3286	0	-

Observa-se na Tabela 4-3 que a presença do sinal estabilizador permite deslocar os polos do sistema em direção ao semiplano lateral esquerdo, agregando amortecimento às oscilações do rotor do VFT. Este comportamento está ilustrado a seguir, através de simulações no tempo realizadas no Simulink do MATLAB.

A Figura 4-9 apresenta a potência ativa  $P_{VFT}$  frente a um degrau unitário na referência de potência  $P_{REF}$ , considerando os ajustes para os ganhos do controlador conforme Caso 2 da Tabela 4-3 ( $k_p=16 / k_i=100 / k_{PSS}=300$ ). Conforme esperado para este grupo de ajustes de controle, a aplicação do degrau resulta em instabilidade oscilatória da potência ativa no VFT.

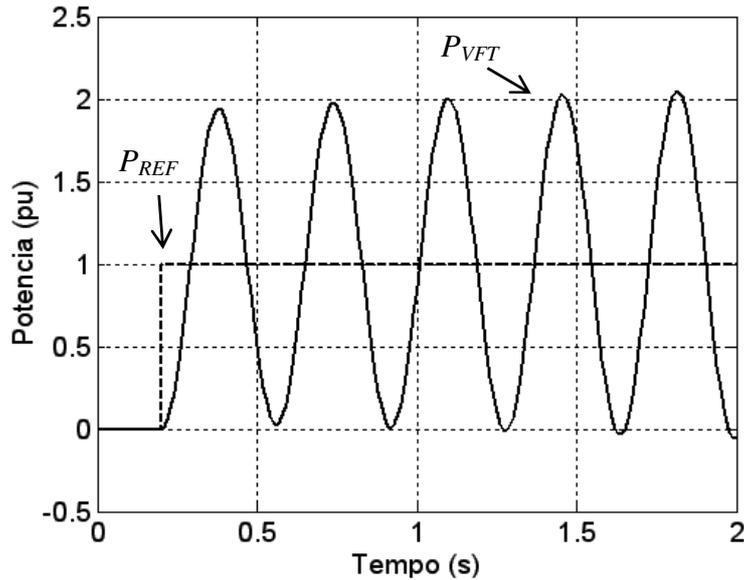


Figura 4-9:  $P_{REF}(t)$  e  $P_{VFT}(t)$  [ $k_p=16 / k_i=100 / k_{PSS}=300$ ].

A Figura 4-10 apresenta a potência ativa  $P_{VFT}$  frente ao mesmo degrau, considerando os ajustes de ganhos referentes ao Caso 6 da Tabela 4-3 ( $k_p=8,5 / k_i=5,5 / k_{PSS}=1000$ ). Para este grupo de ajustes, o sistema apresenta comportamento dinâmico estável com amortecimento adequado.

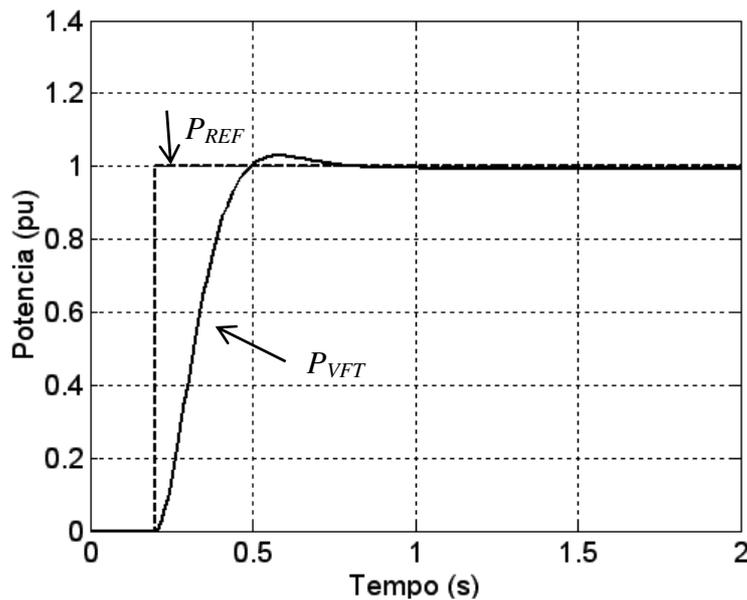


Figura 4-10:  $P_{REF}(t)$  e  $P_{VFT}(t)$  [ $k_p=8,5 / k_i=5,5 / k_{PSS}=1000$ ].

Os resultados obtidos com o modelo linear desenvolvido indicam a necessidade de incluir na estrutura do controlador um sinal adicional estabilizador derivado da velocidade do rotor do VFT. Sem o sinal adicional não é possível prover amortecimento suficiente às oscilações do rotor.

## **4.2 VALIDAÇÃO DOS AJUSTES DE CONTROLE OBTIDOS**

Esta seção apresenta a validação dos resultados obtidos com o modelo linear desenvolvido na seção anterior. A validação foi realizada através da comparação dos resultados do modelo linear com simulações baseadas no modelo completo do VFT, desenvolvido no PSCAD/EMTDC. Os detalhes do modelo desenvolvido no PSCAD/EMTDC estão apresentados no Capítulo 2.

### **4.2.1 AJUSTE DO MODELO COMPLETO NO PSCAD/EMTDC**

Para fins de validação das proposições apresentadas na seção anterior, o modelo desenvolvido no PSCAD/EMTDC foi ajustado de acordo com os parâmetros da rede e do VFT indicados na Tabela 4-1. Parâmetros adicionais foram necessários em face da modelagem mais detalhada utilizada em programas para simulação de transitórios eletromagnéticos, no caso o PSCAD/EMTDC.

O nível de curto-circuito nas barras de 230 kV dos sistemas equivalentes foi ajustado em 2.500 MVA, através de indutâncias internas às fontes, no valor de 4%, na base 100 MVA. O valor eficaz das tensões internas das fontes foi ajustado em 230 kV (1pu), ou seja, tensão nominal.

Para os transformadores elevadores (230/17 kV – 100 MVA), considerou-se o valor de 10% para a reatância de dispersão, conforme indicado na Tabela 4-1. Para a corrente de magnetização, considerou-se um valor típico de 1%.

Para o VFT, representado no modelo PSCAD/EMTDC por uma máquina de indução trifásica de rotor bobinado, foram considerados os parâmetros indicados na Tabela 4-1: constante de inércia H de 26 s, amortecimento mecânico D de 1% e reatância (indutância) de dispersão total  $X_{VFT}$  de 12% (6% para os enrolamentos do estator e 6% para os enrolamentos do rotor). Para o VFT foram considerados os seguintes parâmetros adicionais: reatância (indutância) de magnetização de 5,6 pu e número de polos igual a quatro [4] e resistência de estator e de rotor de 0,5%.

A Figura 4-11 apresenta a estrutura básica do controlador do VFT considerado nas simulações realizadas no PSCAD/EMTDC, para validação dos resultados do modelo linear. O sistema de controle está baseado em controlador proporcional-integral, com limitadores do tipo *non-windup* e com sinal estabilizador derivado da velocidade do rotor do VFT.

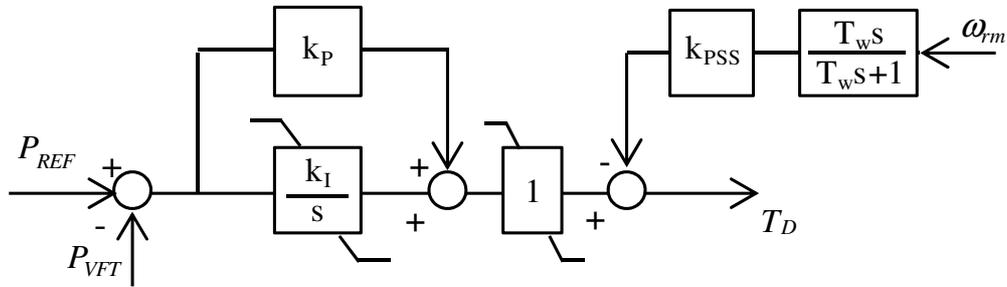


Figura 4-11: Estrutura básica de controle considerada nas simulações PSCAD/EMTDC para validação do modelo linear.

A Tabela 4-4 resume os parâmetros adicionais necessários para a simulação no PSCAD/EMTDC, utilizando o modelo completo apresentado no Capítulo 2. Esses parâmetros são complementares àqueles apresentados na Tabela 4-1.

Tabela 4-4: Parâmetros adicionais necessários para o modelo PSCAD/EMTDC (valores em % na base 100 MVA)

<b>SISTEMAS ELÉTRICOS EQUIVALENTES 1 E 2</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Valor eficaz das tensões das fontes equivalentes	230 kV (1 pu)
Indutância interna das fontes equivalentes	0,056 H
<b>VFT</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Número de polos da máquina	4
Corrente de magnetização dos transformadores	1%
Perdas ôhmicas de rotor e estator	0,5%
Indutância de magnetização	560%
<b>SISTEMA DE CONTROLE</b>	
Limites do controlador PI	-4 e +4
Tipo de limitador no canal integral	<i>non-windup</i>

#### 4.2.2 CASO 6, COM GANHOS ( $K_P=8,5 / K_I=5,5 / K_{PSS}=1000$ )

Apresentam-se, a seguir, resultados de simulações baseadas no modelo desenvolvido no PSCAD/EMTDC, considerando a estrutura de controlador PI com sinal adicional estabilizador e com os ganhos referentes ao Caso 6 da Tabela 4-3 (  $k_P=8,5 / k_I=5,5 / k_{PSS}=1000 / T_w=3s$  ). Registre-se que na análise linear este grupo de ajustes resultou em desempenho dinâmico estável e bem amortecido.

Nas simulações, os seguintes eventos foram considerados:

- $t_0=3s$  energização do VFT pelos enrolamentos do estator;
- $t_1=7s$  sincronização do VFT, com energização do rotor;
- $t_2=10s$  degrau +100 MW na referência de potência do VFT;
- $t_3=15s$  degrau -100 MW na referência de potência do VFT;
- $t_4=20s$  degrau -100 MW na referência de potência do VFT;
- $t_5=25s$  degrau +100 MW na referência de potência do VFT.

A Figura 4-12 apresenta a potência  $P_{VFT}$  na interligação quando da aplicação de degraus na referência de potência  $P_{REF}$ . Por convenção, valores positivos de  $P_{VFT}$  indicam que o sentido do fluxo de potência ativa é do sistema conectado ao rotor (Sistema 1) para o sistema conectado ao estator (Sistema 2).

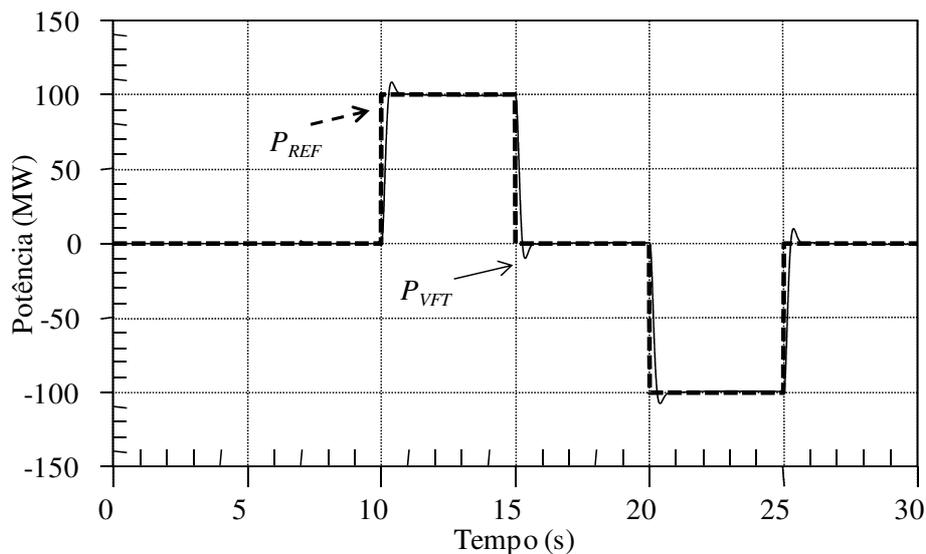


Figura 4-12: Potências  $P_{REF}$  e  $P_{VFT}$  (em MW) – Degrau unitário em  $P_{REF}$ , Caso 6.

Observa-se na Figura 4-12 que o desempenho dinâmico do VFT é estável e apresenta amortecimento satisfatório para a estrutura e ajustes de controle considerados, conforme previsto na análise linear apresentada na seção anterior. O dispositivo segue a referência de potência sem apresentar erro de regime permanente.

Para os ajustes considerados, verifica-se ultrapassagem do sinal de referência de potência, ligeiramente superior àquela observada com o modelo linear (8% no modelo PSCAD/EMTDC *versus* 4% no modelo linear). O tempo de subida é de 280 ms, valor observado na resposta de ambos os modelos.

A Figura 4-13 apresenta o torque mecânico  $T_D$  aplicado no eixo do VFT e o torque eletromagnético de reação  $T_E$ , em resposta aos eventos considerados. Conforme abordado anteriormente, a aplicação do torque  $T_D$  no eixo do VFT tem o objetivo de estabelecer defasagem angular entre os campos do estator e do rotor, viabilizando o fluxo de potência pelo VFT.

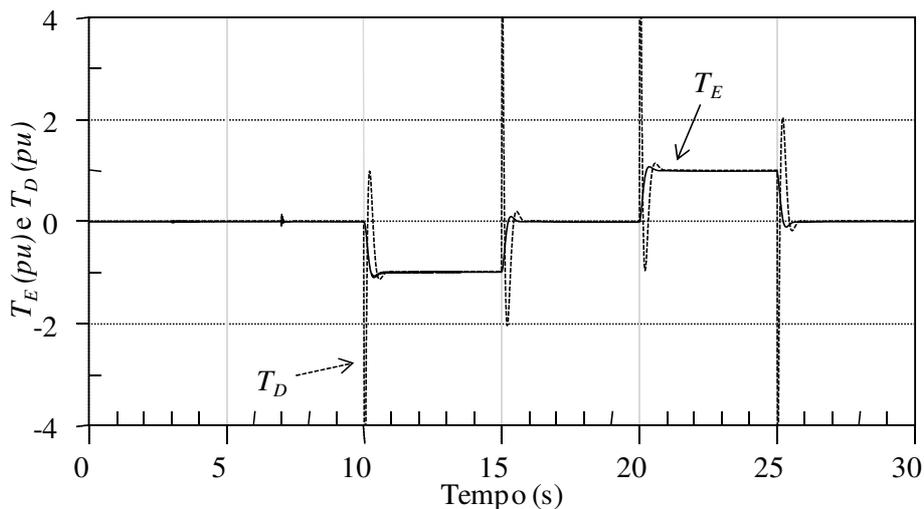


Figura 4-13:  $T_D$  (em pu) e  $T_E$  (em pu) – Degrau unitário em  $P_{REF}$ , Caso 6.

Observa-se na Figura 4-13 que logo após a aplicação do degrau, durante o regime transitório, os torques  $T_D$  e  $T_E$  não são iguais. A diferença entre os mesmos corresponde ao torque acelerante que é necessário para o movimento do rotor e para o estabelecimento de novo valor de defasagem angular entre os campos de estator e rotor. Transcorrido o período transitório, os torques  $T_D$  e  $T_E$  se igualam e a aceleração do rotor se anula. Registre-se que os limitadores do controlador PI impõem restrições ao torque mecânico  $T_D$  a ser aplicado, neste caso em  $\pm 4$  pu.

A Figura 4-14 apresenta a velocidade  $\omega_m$  do rotor do VFT, medida em rpm. Observa-se que a velocidade é nula nos períodos em que o sistema encontra-se em regime permanente. Esse resultado é compatível com o desvio de frequência verificado entre os sistemas interligados, que é nulo nesta condição operativa (60:60Hz). Verifica-se aceleração ou desaceleração do VFT nos períodos de transição entre uma condição operativa e outra, para que o novo valor de defasagem angular entre os campos de estator e rotor possa ser atingido. Para as condições analisadas, o rotor do VFT atingiu velocidades máximas de 12 rpm.

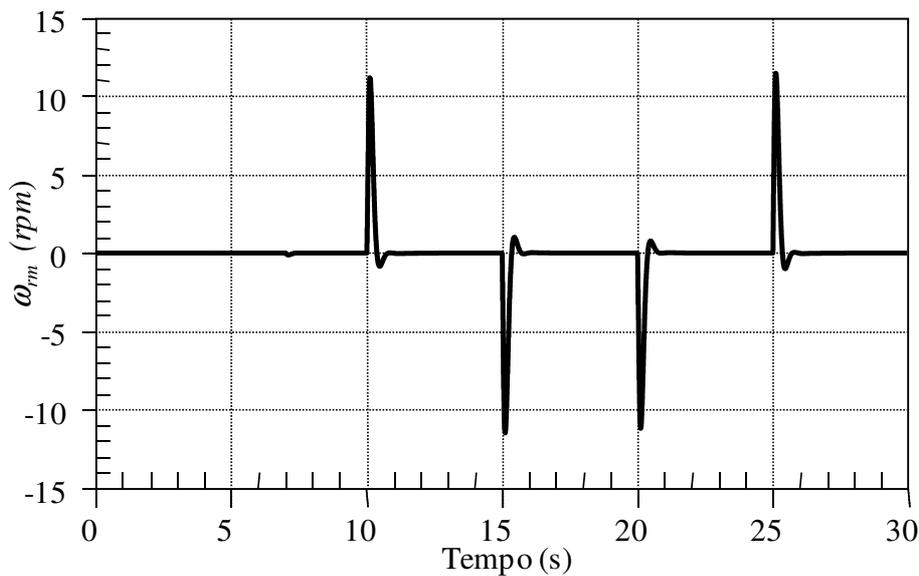


Figura 4-14: Velocidade do rotor  $\omega_m$  (em rpm) – Degrau unitário em  $P_{REF}$ , Caso 6.

A Figura 4-15 apresenta a defasagem angular  $\theta_{VFT}$  imposta pelo VFT, em graus. Conforme abordado anteriormente, o ângulo  $\theta_{VFT}$  corresponde à defasagem angular entre os campos produzidos pelos enrolamentos do estator e rotor imposta pelo VFT.

Observa-se na Figura 4-15 que  $\theta_{VFT}$  é zero no início da simulação (de 0 a 10 s), período no qual a potência ativa na interligação ( $P_{VFT}$ ) também é nula. No instante  $t_2=10s$ , em resposta ao degrau na referência de potência, o sistema de controle atua aplicando torque mecânico no eixo do VFT e, como resultado, estabelece-se defasagem angular  $\theta_{VFT}$  diferente de zero. Para as condições analisadas, a defasagem angular assumiu valores da ordem de  $\pm 17$  graus para valores de potência ativa no VFT de 100 MW. Esse valor de defasagem é compatível com as características da rede e com o nível de potência transferido entre os sistemas.

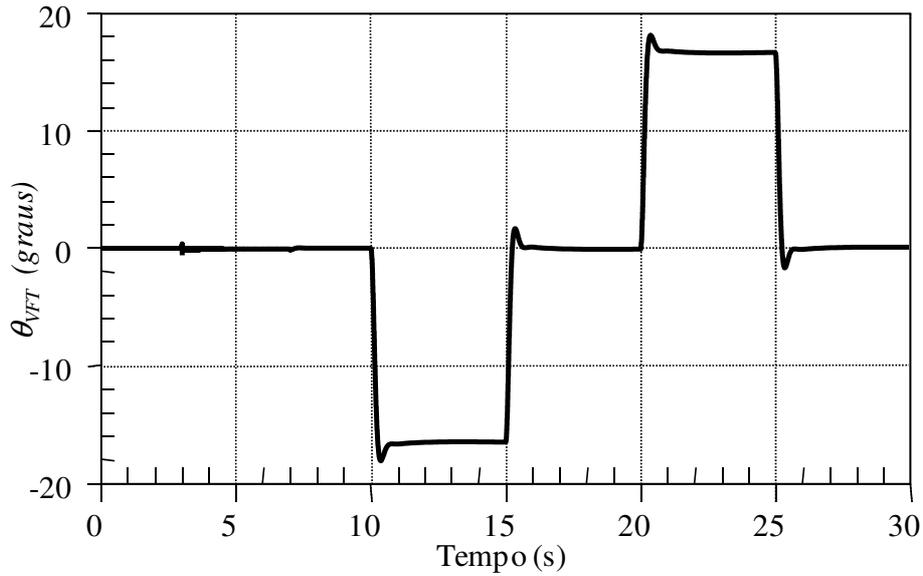


Figura 4-15: Defasagem angular  $\theta_{VFT}$  (em graus) – Degrau unitário em  $P_{REF}$ , Caso 6.

A Figura 4-16 apresenta o perfil de tensão nos sistemas elétricos. A figura apresenta o valor eficaz das tensões nos sistemas equivalentes 1 e 2, em pu.

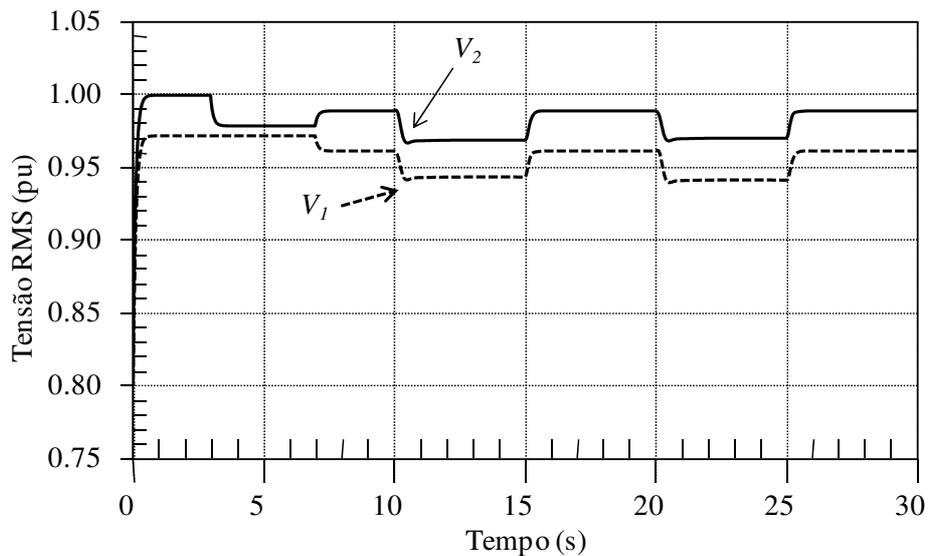


Figura 4-16: Perfil de tensão (em pu) – Degrau unitário em  $P_{REF}$ , Caso 6.

Verifica-se ligeira redução na tensão do Sistema 2, conectado ao estator, no instante da energização do VFT ( $t_0=3$ s). Essa redução de tensão está associada à circulação da corrente de magnetização do VFT pela rede após a energização do equipamento. No instante do fechamento do rotor ( $t_1=7$ s) observa-se elevação da tensão do Sistema 1 e redução da tensão do Sistema 2. De fato, após este instante a corrente de magnetização do VFT passa a ser suprida por ambos os sistemas.

Ressalta-se que a redução de tensão é maior nos períodos nos quais o VFT transfere potência ativa (entre os instantes 10 e 15s e entre 20 e 25s). Nestes períodos, a redução de tensão adicional decorre do efeito da dispersão nos enrolamentos do estator e rotor do VFT. Nesta análise não foram consideradas ações para controle do perfil de tensão da rede.

A Figura 4-17 apresenta a diferença entre o torque eletromagnético  $T_E$  e a potência ativa que entra pelo estator do VFT ( $T_E - P_{ST}$ ), em pu. Para esta análise foram desprezadas as resistências do rotor e estator e as perdas mecânicas no VFT.

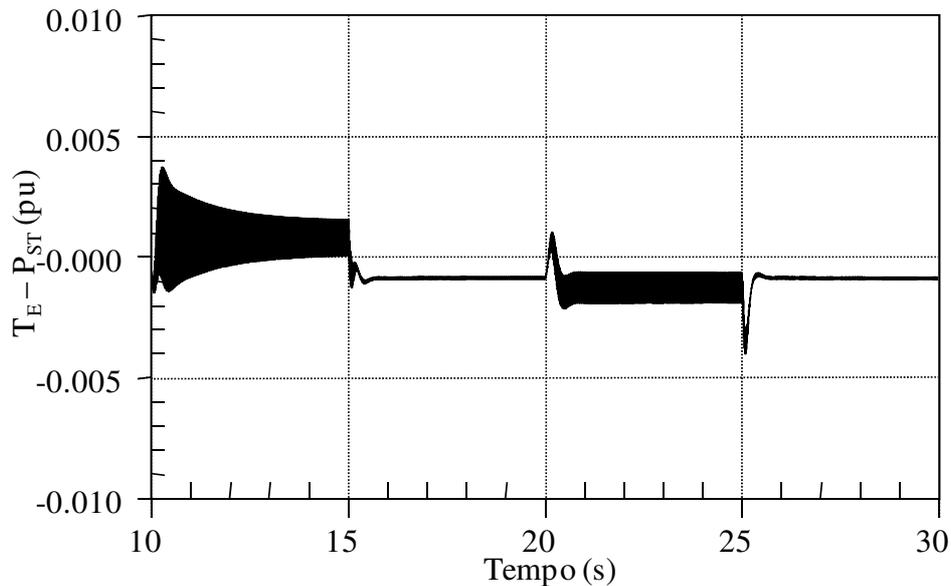


Figura 4-17:  $T_E - P_{EST}$  (em pu) – Degrau unitário em  $P_{REF}$ , Caso 6.

Verifica-se que a diferença entre as grandezas  $T_E$  e  $P_{ST}$  é muito reduzida e está associada à solução numérica realizada pela ferramenta de simulação. De fato, a diferença  $T_E - P_{ST}$  permanece inferior a 0,3% entre os instantes 10 e 15s e 20 e 25s, período no qual o VFT transfere potência nominal.

Ressalta-se que para o desenvolvimento do modelo linear considerou, como premissa, que o torque eletromagnético  $T_E$  poderia ser aproximado pela potência ativa que flui pelo VFT ( $P_{VFT}$ , em pu), hipótese que se mostra bastante razoável para as condições analisadas. Conforme apresentado no Capítulo 2, fica evidente em (51) que essa aproximação pode ser feita caso sejam desprezados os desvios de frequência nos sistemas conectados ao estator e rotor da MIDA.

Nos casos onde há maiores variações de frequência, hipótese que será analisada nos capítulos subsequentes, esta aproximação introduz erros na modelagem que não podem ser desconsiderados.

#### 4.2.3 CASO 7, COM GANHOS ( $K_P=8,5 / K_I=5,5 / K_{PSS}=300$ )

Apresentam-se, a seguir, resultados de simulações baseadas no modelo desenvolvido no PSCAD/EMTDC, considerando a estrutura de controlador PI com sinal adicional estabilizador e com os ganhos referentes ao Caso 7 da Tabela 4-3 ( $k_p=8,5 / k_i=5,5 / k_{PSS}=300 / T_w=3s$ ). Registre-se que na análise linear este grupo de ajustes resultou em desempenho dinâmico estável, mas com amortecimento baixo, em face da redução do ganho do canal estabilizador em comparação com o Caso 6 ( $k_{PSS}$  de 1000 para 300).

Na simulação, foram considerados os mesmos eventos indicados no caso anterior:  $t_0=3s$  - energização;  $t_1=7s$  - sincronização;  $t_2=10s$  - degrau +100 MW;  $t_3=15s$  - degrau -100 MW;  $t_4=20s$  - degrau -100 MW e  $t_5=25s$  - degrau +100 MW.

A Figura 4-18 apresenta a potência  $P_{VFT}$  na interligação quando da aplicação de degraus na referência de potência  $P_{REF}$ . Observa-se que o desempenho dinâmico do sistema é estável, mas apresenta amortecimento muito baixo, conforme previsto na análise linear apresentada na seção anterior.

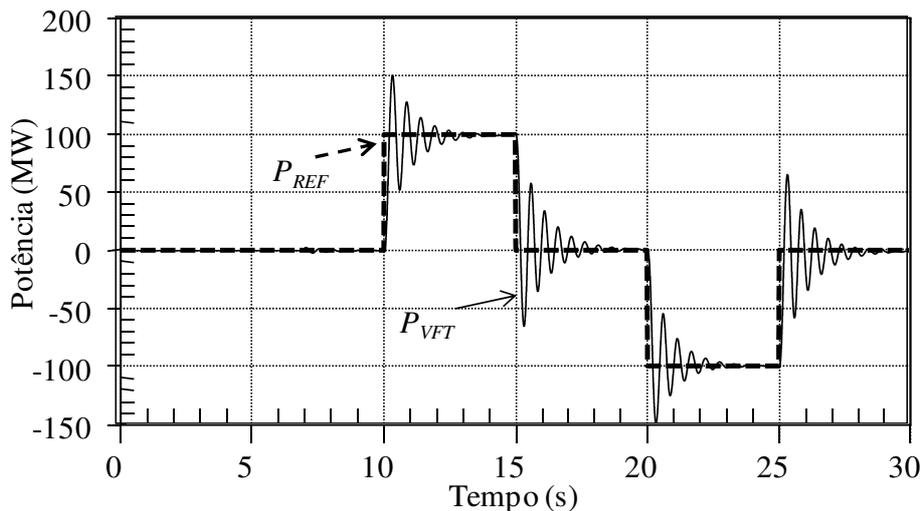


Figura 4-18: Potências  $P_{REF}$  e  $P_{VFT}$  (em MW) – Degrau unitário em  $P_{REF}$ , Caso 7.

A Figura 4-19 apresenta o torque mecânico  $T_D$  aplicado no eixo do VFT e o torque eletromagnético de reação  $T_E$ , em resposta aos eventos considerados. Como

esperado, as oscilações observadas no sinal de potência  $P_{VFT}$  estão também presentes no torque eletromagnético  $T_E$ .

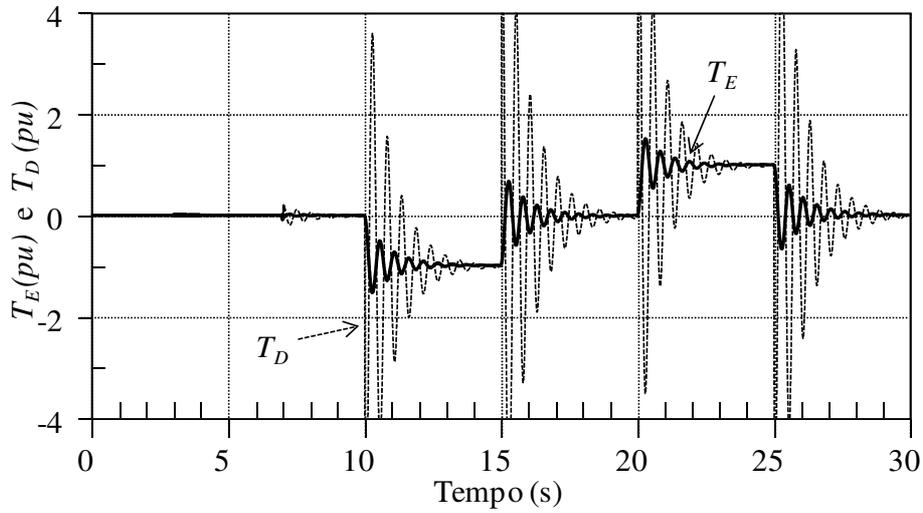


Figura 4-19:  $T_D$  (em pu) e  $T_E$  (em pu) – Degrau unitário em  $P_{REF}$ , Caso 7.

A Figura 4-20 apresenta a velocidade do rotor do VFT, que atinge valores de até 18 rpm neste caso. O sistema leva cerca de cinco segundos até a estabilização completa, considerando os ajustes referentes ao Caso 7.

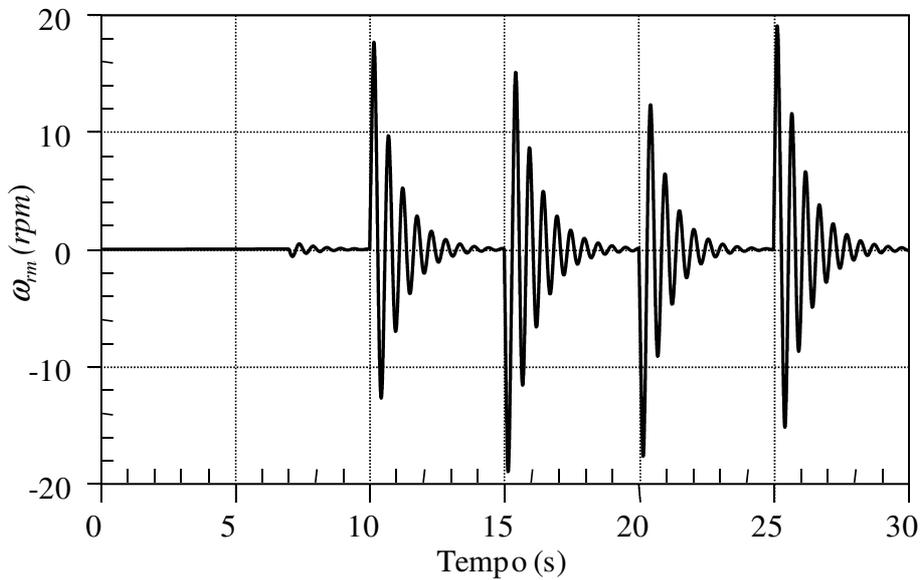


Figura 4-20: Velocidade do rotor  $\omega_{rm}$  (em rpm) – Degrau unitário em  $P_{REF}$ , Caso 7.

#### 4.2.4 CASO 2, COM GANHOS ( $K_P=16 / K_I=100 / K_{PSS}=300$ )

Apresentam-se, a seguir, resultados de simulações baseadas no modelo desenvolvido no PSCAD/EMTDC, considerando a estrutura de controlador PI com sinal adicional estabilizador e com os ganhos referentes ao Caso 2 da Tabela 4-3 ( $k_p=16 / k_i=100 / k_{PSS}=300 / T_w=3s$ ). Na análise linear este grupo de ajustes resultou em desempenho dinâmico instável, por apresentar amortecimento negativo.

Nas simulações, foram considerados os mesmo eventos indicados nos casos anteriores.

A Figura 4-21 apresenta a potência  $P_{VFT}$  na interligação e o sinal de referência de potência  $P_{REF}$ . Observa-se que o desempenho dinâmico do sistema é instável e apresenta amortecimento negativo. Deve-se ressaltar que o VFT começa a oscilar no instante do fechamento dos enrolamentos do rotor ( $t_1=7s$ ), antes mesmo da aplicação do degrau de potência na referência ( $t_2=10s$ ). Observa-se que a ação do sinal estabilizador não é suficiente para a estabilização do sistema neste caso, considerando os ajustes referentes ao Caso 2 da Tabela 4-3.

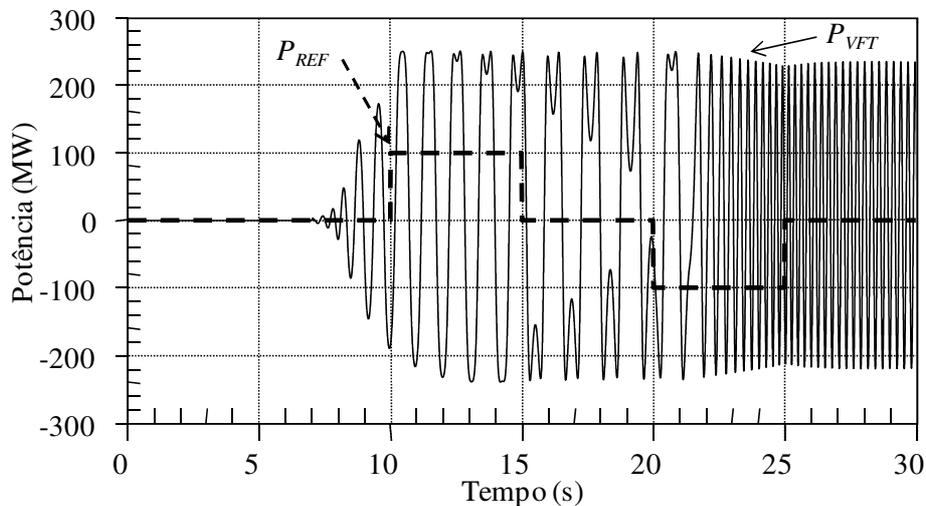


Figura 4-21: Potências  $P_{REF}$  e  $P_{VFT}$  (em MW) – Degrau unitário em  $P_{REF}$ , Caso 2.

#### 4.3 ESTRUTURA E FAIXAS DE AJUSTES PARA O CONTROLADOR DO VFT

Não obstante as aproximações consideradas, o modelo linear do VFT e da rede elétrica permite capturar satisfatoriamente o comportamento dinâmico básico do VFT, conforme demonstram os resultados de simulação com o modelo completo do VFT apresentados na seção anterior. Desta forma, é possível estabelecer a estrutura básica

do sistema de controle do VFT, apresentada na Figura 4-22, considerando a interligação de sistemas elétricos de diferentes características.

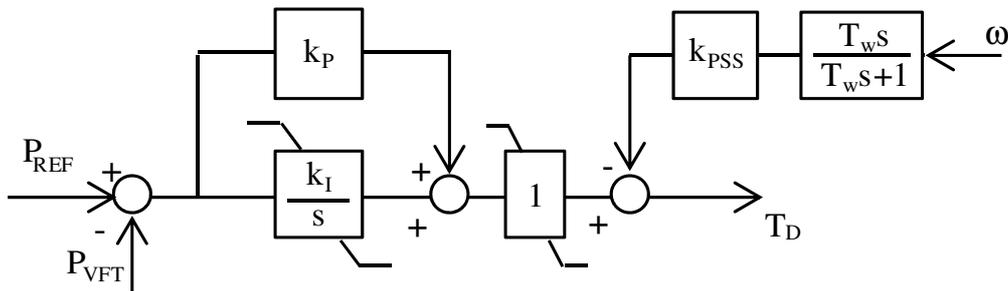


Figura 4-22: Estrutura básica de controle proposta.

A Tabela 4-5 apresenta a faixa de ajustes típicos proposta para o controlador do VFT, considerando valores típicos para as impedâncias das redes equivalentes a serem interligadas.

Tabela 4-5: Faixa de ajustes proposta para o controlador do VFT

Parâmetro	Faixa
PI – Ganho do canal proporcional ( $k_P$ )	1..10
PI – Ganho do canal integral ( $k_I$ )	1..10
Estabilizador – Ganho ( $k_{PSS}$ )	300..1000
Estabilizador – Constante de tempo do filtro <i>washout</i> ( $T_w$ )	3s
Limites do controlador PI	-3 e +3

#### 4.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou uma proposta de sistema de controle para o VFT, baseada em controlador proporcional-integral com sinal estabilizador derivado da velocidade do rotor da máquina. A proposição da estrutura do controlador, bem com a otimização do seu desempenho, foi realizada através da análise do modelo linearizado de sistemas elétricos genéricos interligados pelo VFT. Os resultados obtidos foram validados através de simulações com o modelo completo do VFT, desenvolvido no programa de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC.

Como conclusão, fica evidente que o VFT apresenta – naturalmente – torques em fase com os desvios angulares (torques de sincronismo), mesmo sem ação de controle. Por outro lado, ficou demonstrado que o amortecimento das oscilações do

rotor do VFT é quase nulo sem ação de um sistema de controle adequado. A utilização de sinais adicionais estabilizadores, baseados nos desvios da velocidade do VFT, agrega amortecimento suficiente às oscilações do rotor do VFT, conforme demonstrado através das análises realizadas. Como contribuição da tese, foram propostas a estrutura e os ajustes de um controlador típico para o equipamento.

## **5 DESENVOLVIMENTO DE MODELO DO VFT PARA SIMULAÇÃO DE TRANSITÓRIOS ELETROMECCÂNICOS**

Este capítulo apresenta uma proposta de modelo para o VFT destinado à simulação de transitórios eletromecânicos em sistemas de potência. O modelo baseia-se nas equações completas da Máquina de Indução de Dupla Alimentação (MIDA), apresentadas no Capítulo 2, e constitui uma importante contribuição. A proposta viabiliza a análise de condições normais de operação, bem como de condições operativas nas quais se verificam grandes desvios de frequência entre os sistemas interligados. Além disso, permite simular a interligação de sistemas elétricos de frequência nominal diferente usando o VFT.

O modelo proposto para o VFT foi implementado no programa ANATEM e pode ser empregado em análises do desempenho dinâmico do Sistema Interligado Nacional (SIN). A implementação está baseada em fontes de corrente controladas, utilizando rotinas computacionais para representação dos componentes do VFT. A validação da modelagem foi feita através da comparação dos resultados obtidos com aqueles obtidos com o modelo para PSCAD/EMTDC apresentado no Capítulo 3 e com resultados disponíveis na literatura.

Ressalta-se que o ANATEM é a ferramenta oficial para simulação de transitórios eletromecânicos no SIN. Atualmente, é utilizado pelas empresas do setor elétrico brasileiro nos estudos de planejamento da expansão, planejamento e programação da operação. Neste sentido, dispor de um modelo completo do VFT no programa ANATEM é fundamental para que o equipamento possa ser considerado como alternativa para aplicação no SIN.

O capítulo está estruturado em três seções principais. A primeira apresenta a estrutura do modelo de VFT desenvolvido, bem como a estratégia para sua implementação no ANATEM. Na segunda seção são apresentados resultados de simulação que ilustram o funcionamento do modelo. A validação do modelo desenvolvido é apresentada na última seção do capítulo.

### **5.1 O MODELO DO VFT PROPOSTO**

Esta seção apresenta as características do modelo digital do VFT desenvolvido para o programa ANATEM.

### 5.1.1 COMPATIBILIZAÇÃO COM O MODELO DA REDE CA

Na representação de máquinas síncronas em estudos de estabilidade de sistemas de potência são desprezados os transitórios elétricos de estator, ou seja, os termos  $p\psi_{ds}$  e  $p\psi_{qs}$ . Desprezar estes termos nas equações que representam a máquina síncrona significa eliminar a componente contínua nas correntes de estator, representando apenas a componente de frequência fundamental. Conforme indicado em [29], esta simplificação do modelo da máquina síncrona é essencial, pois permite compatibilizá-lo com os demais modelos da rede elétrica conectada aos terminais do estator. Ressalta-se que os transitórios da rede CA decaem rapidamente no tempo e são geralmente desprezados em estudos de transitórios eletromecânicos.

Da mesma forma que na máquina síncrona, os transitórios elétricos de estator também devem ser desprezados no modelo do VFT, para que o mesmo possa ser conectado à rede CA. Além disso, no caso particular do VFT, os enrolamentos do rotor são também conectados à rede CA, através de anéis coletores. Resulta desta característica a necessidade de também desprezar os transitórios elétricos de rotor, ou seja, os termos  $p\psi_{dr}$  e  $p\psi_{qr}$ .

Quando são desprezados os transitórios de estator e rotor em (32) e considerando o referencial  $d-q$  girante na frequência síncrona, obtém-se as seguintes equações algébricas indicadas na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v'_{qr} \\ v'_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & \omega L_{ss} & 0 & \omega L_M \\ -\omega L_{ss} & r_s & -\omega L_M & 0 \\ 0 & (\omega - \omega_r)L_M & r'_r & (\omega - \omega_r)L'_{rr} \\ -(\omega - \omega_r)L_M & 0 & -(\omega - \omega_r)L'_{rr} & r'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix}. \quad (67)$$

### 5.1.2 BALANÇO DE ENERGIA NO VFT

Conforme abordado no Capítulo 2, seção 2.3.2, o VFT funciona como um transformador quando não há diferença de frequência entre os sistemas que são interligados. Neste caso, a menos das perdas, toda a energia elétrica que entra na máquina sai também sob forma de energia elétrica.

De outra forma, quando há diferença de frequência entre os sistemas, há conversão de energia elétrica em energia mecânica e vice-versa. Neste caso, uma parcela da energia pode fluir do sistema de acionamento para a rede elétrica CA ou desta para o sistema de acionamento.

Para fins de simulação, não é suficiente calcular as potências ativas nos enrolamentos de estator e rotor. O modelo do dispositivo deve ser capaz de determinar a potência mecânica no eixo, de forma a injetar na rede a energia correspondente. Para tanto, o modelo desenvolvido calcula uma componente adicional de corrente que é injetada na rede elétrica, no sistema conectado ao estator do VFT.

### 5.1.3 ESTRUTURA DO MODELO

A Figura 5-1 apresenta a estrutura básica do modelo do VFT proposto para simulação de transitórios eletromecânicos. Na figura,  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $i_1$  e  $i_2$  são os valores instantâneos das tensões e correntes de sequência positiva verificadas nos sistemas 1 e 2 interligados pelo VFT, respectivamente. A interface do modelo com a rede elétrica é efetivada por fontes de corrente controladas, responsáveis pela injeção das correntes  $i_1$  e  $i_2$  calculadas pelo modelo durante a simulação.

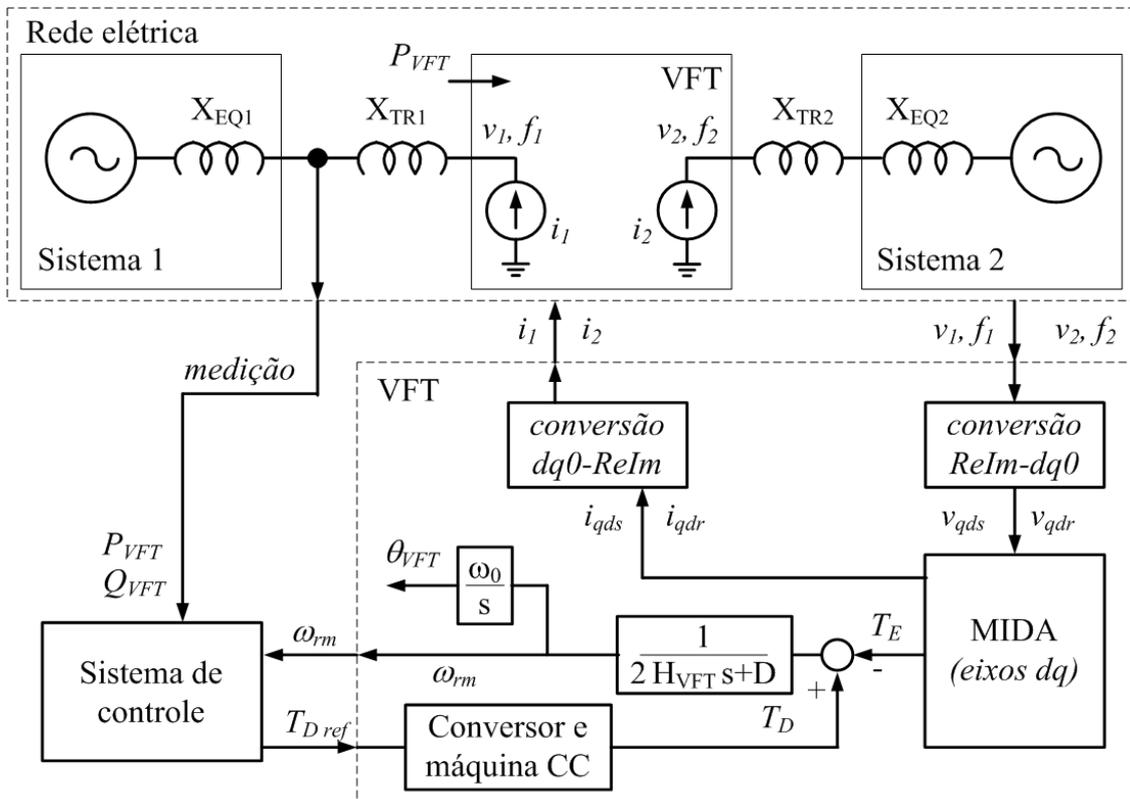


Figura 5-1: Estrutura do modelo do VFT para simulação de transitórios eletromecânicos no ANATEM.

Deve-se observar que a estrutura proposta independe de qualquer conexão elétrica entre os sistemas a serem interligados. Esta característica confere maior flexibilidade ao modelo, viabilizando (i) a simulação de condições operativas que resultem em maiores excursões de frequência quando de contingências nos sistemas elétricos e (ii) a análise da conexão de sistemas de frequência nominal distinta.

O modelo desenvolvido considera as seguintes etapas para simulação do VFT, realizadas a cada passo de integração do processo de simulação de transitórios eletromecânicos:

- i. Importação dos valores de amplitude e fase da tensão de sequência positiva ( $v_1, v_2$ ) e frequência ( $f_1, f_2$ ) da rede elétrica para o modelo do VFT. As medições de tensão e frequência são realizadas nas fronteiras dos sistemas 1 e 2 com o modelo do VFT;
- ii. Importação dos valores de potência ativa ( $P_{VFT}$ ) e reativa ( $Q_{VFT}$ ) medidos na fronteira do Sistema 1 para o sistema de controle do VFT, conforme indicado na Figura 5-1;
- iii. Cálculo dos valores de tensão de estator ( $v_{qs}, v_{ds}$ ) e rotor ( $v_{qr}, v_{dr}$ ) nas coordenadas  $d-q$ , a partir dos valores das tensões ( $v_1, v_2$ ) importados da rede elétrica. Para determinação das grandezas nos eixos  $d-q$ , considerou-se um referencial girante na frequência síncrona do sistema que se conecta ao estator do VFT;
- iv. Cálculo dos enlaces de fluxo de estator e rotor na MIDA, nos eixos  $d-q$ ;
- v. Cálculo do torque eletromagnético  $T_E$  produzido pela MIDA como resultado da interação dos campos de estator e rotor;
- vi. Cálculo da referência de torque  $T_{Dref}$  pelo sistema de controle do VFT;
- vii. Determinação do torque mecânico  $T_D$  a ser aplicado no eixo do VFT, considerando as limitações do sistema de acionamento e máquina de corrente contínua;
- viii. Cálculo do torque acelerante, como resultado da diferença entre o torque aplicado  $T_D$  e o torque eletromagnético  $T_E$ ;
- ix. Cálculo da velocidade do VFT e defasagem angular  $\theta_{VFT}$  entre os campos de rotor e estator, a partir da equação da dinâmica do rotor;

- x. Cálculo das correntes de estator ( $i_{qs}$ ,  $i_{ds}$ ) e rotor ( $i_{qr}$ ,  $i_{dr}$ ) nas coordenadas  $d-q$ ;
- xi. Cálculo dos valores de corrente de estator e rotor de sequência positiva, nos eixos  $Re-Im$  de acordo com a referência adotada pelo ANATEM;
- xii. Injeção na rede elétrica CA dos valores de corrente calculados pelo modelo.

#### **5.1.4 IMPLEMENTAÇÃO NO PROGRAMA ANATEM**

A implementação do modelo no programa ANATEM foi feita através do modelo de fonte *shunt* controlada (DFNT), que permite modelar a injeção de potência ativa e reativa na rede através de fontes controladas, ligadas em derivação.

Foram utilizadas duas fontes de corrente controladas (DFNT) para representação dos terminais de estator e rotor do VFT. O modelo associa a cada fonte de corrente um Controlador Definido pelo Usuário (CDU), no qual as equações que determinam o comportamento do VFT foram programadas.

Os CDUs são rotinas computacionais desenvolvidas em linguagem de programação própria do ANATEM. A cada passo de integração, essas rotinas calculam as componentes real e imaginária das correntes de estator e rotor, baseando-se no modelo do VFT, nas condições da rede CA e na referência de potência adotada. Na prática, a interligação entre os dois sistemas elétricos é simulada através da troca de informações entre os CDUs desenvolvidos.

A interface dos CDUs com as fontes de corrente controladas é feita através da (i) importação das grandezas elétricas da rede e da (ii) exportação das componentes Real e Imaginária das correntes de estator e rotor que são injetadas na rede, a cada passo de integração. As rotinas desenvolvidas estão apresentadas no Apêndice 1.

## **5.2 DESEMPENHO DO MODELO PROPOSTO**

Esta seção apresenta resultados de simulação no programa ANATEM considerando o modelo proposto submetido a diferentes condições operativas. Os resultados permitem aferir o comportamento transitório do modelo.

Foram analisadas diversas configurações para as redes elétricas, incluindo a representação por fontes de tensão ideais e por equivalentes de máquinas síncronas, considerando diferentes níveis de curto-circuito trifásico nas barras de conexão do

VFT. Para estas simulações, não foi objetivo a determinação de ajustes de controle otimizados para cada uma das configurações da rede.

### 5.2.1 CONEXÃO ASSÍNCRONA ENTRE SISTEMAS IDEAIS (CASO 1)

A Figura 5-2 apresenta o sistema considerado para análise de uma conexão assíncrona de sistemas elétricos ideais. No programa de fluxo de potência (ANAREDE), os sistemas elétricos equivalentes foram representados por barras de referência (100 e 200), formando duas ilhas eletricamente isoladas. A conexão efetiva entre elas é realizada, apenas, na simulação dinâmica através da troca de informações entre as fontes de corrente controladas por CDUs.

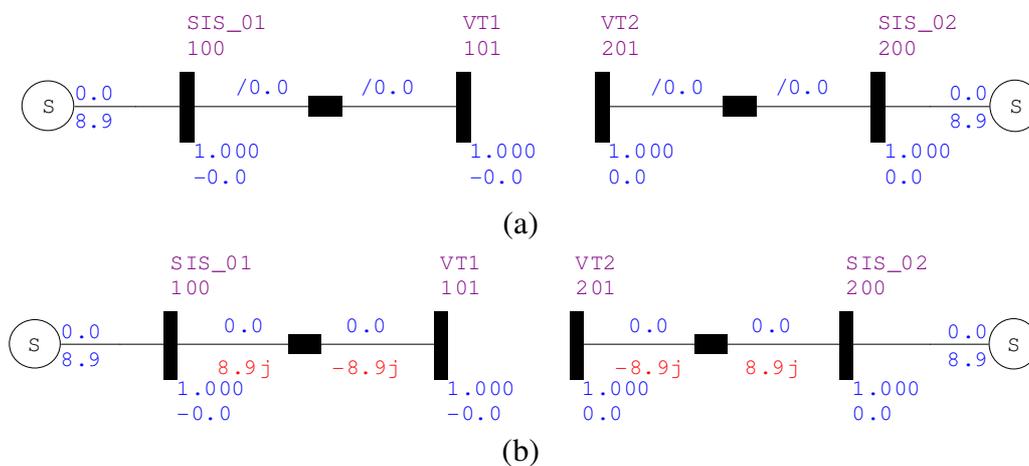


Figura 5-2: Sistema considerado no Caso 1: (a) impedâncias; (b) fluxo de potência.

A conexão do VFT na simulação dinâmica (ANATEM) é feita entre as barras 101 e 201 indicadas no diagrama da Figura 5-2. É importante observar que embora o VFT não esteja representado no caso base de fluxo de potência, devem ser fornecidas condições de fronteira coerentes para que o processo de inicialização da simulação dinâmica seja viável. No caso apresentado, as condições de fronteira resultam na injeção de 17,8 Mvar de potência reativa nas barras 101 e 201, correspondente à corrente de magnetização do VFT para a operação em vazio. Para cada condição analisada, a definição das condições de fronteira foi realizada manualmente, em face da impossibilidade de incluir o VFT na solução de fluxo de potência (ANAREDE).

A Figura 5-3 apresenta a potência ativa na interligação, considerando os seguintes degraus na referência de potência do VFT: (i) de zero para 100 MW, em  $t=10s$ ; (ii) de 100 para zero, em  $t=15s$ ; (iii) de zero para -100 MW, em  $t=20s$ ; e de -100 para zero, em  $t=25s$ .

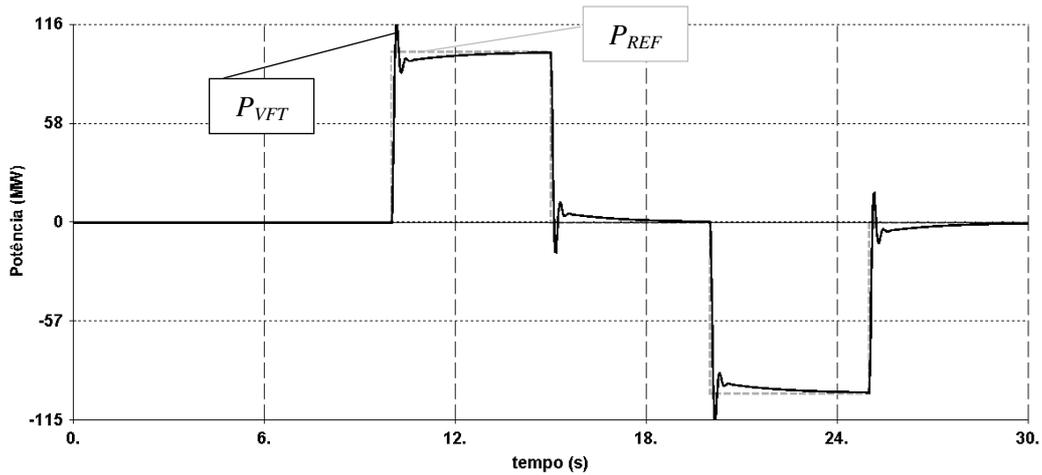


Figura 5-3: Potência de referência ( $P_{REF}$ ) e na interligação ( $P_{VFT}$ ).

A Figura 5-4 apresenta a potência reativa nas barras terminais do VFT. Na figura, valores negativos indicam absorção de potência reativa da rede, pelo VFT. Observa-se que nos períodos em que a transferência de potência ativa é nula (de 0 e 10s; de 15 e 20s; e de 25 a 30s), verifica-se absorção de 18 Mvar da rede para magnetização da máquina. Nos períodos onde há transferência de potência ativa, a absorção de potência reativa é maior em função do fenômeno da dispersão de fluxo magnético nos enrolamentos.

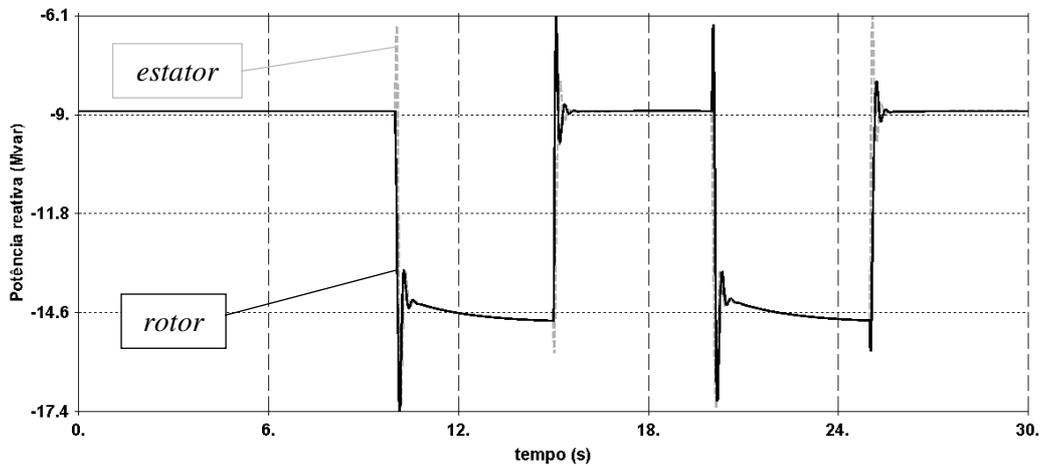


Figura 5-4: Potência reativa nos terminais de estator e rotor (em Mvar).

A Figura 5-5 apresenta o torque eletromagnético e o torque aplicado ao eixo do VFT pelo sistema de acionamento. Observa-se que o torque aplicado  $T_D$  tem limites em  $\pm 4$  pu (limitadores no controlador PI), porém estes limites só são atingidos em poucos instantes na simulação.

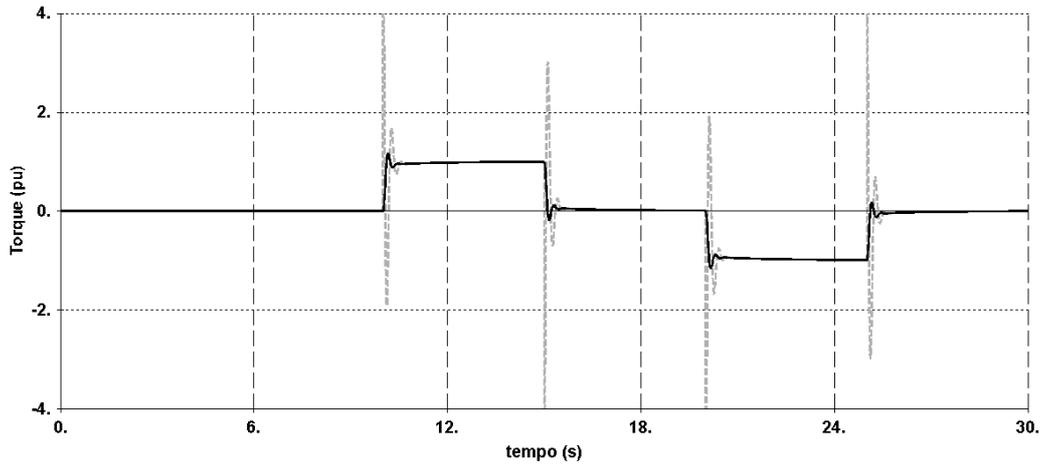


Figura 5-5: Torque eletromagnético ( $T_E$ ) e torque aplicado ( $T_D$ ).

A Figura 5-6 apresenta a defasagem angular entre os campos de estator e rotor imposta pelo VFT. A defasagem atinge  $\pm 7$  graus nos períodos de máxima transferência de potência, valor que está coerente com as características do sistema analisado nesta condição operativa.

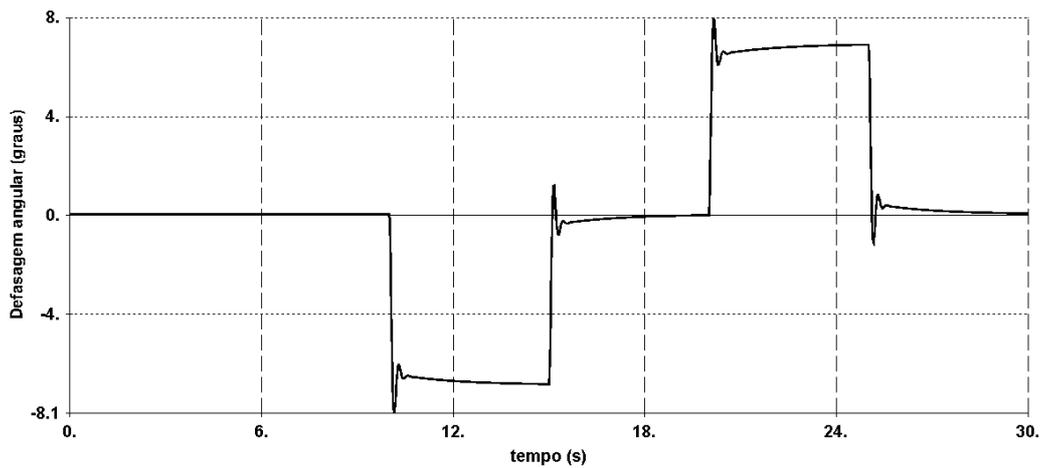


Figura 5-6: Defasagem angular  $\theta_{VFT}$  (graus).

A velocidade do rotor do VFT está apresentada na Figura 5-7. Observa-se que a velocidade da máquina é nula em regime permanente, pois não foram considerados – nesta condição operativa – desvios de frequência entre os sistemas interligados.

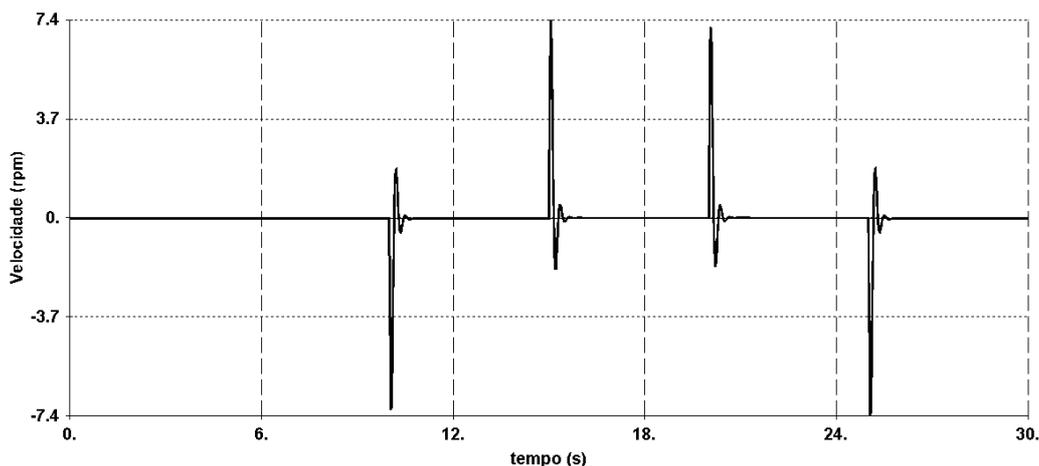


Figura 5-7: Velocidade do rotor (em rpm).

Por fim, a Figura 5-8 apresenta a potência mecânica no eixo do VFT. Conforme esperado, a potência mecânica é nula em regime permanente, mesmo nos períodos em que há transferência de potência. De fato, a condição simulada não considera a existência de diferenças de frequência entre os dois sistemas.

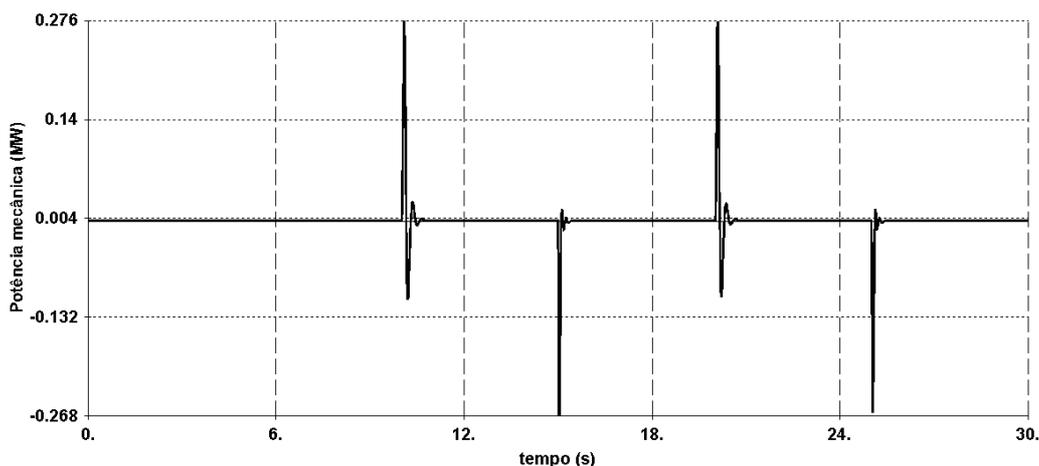


Figura 5-8: Potência mecânica no eixo do VFT (em MW).

Observa-se que o modelo apresenta comportamento coerente com aquele esperado para o VFT. O dispositivo segue adequadamente as referências de potência e apresenta amortecimento satisfatório das oscilações de rotor. Registre-se que os ajustes de controle utilizados não estão otimizados para esta condição operativa.

## 5.2.2 CONEXÃO ASSÍNCRONA ENTRE SISTEMAS 2000 MVA DE NCC (CASO 2)

A Figura 5-9 apresenta o sistema considerado para análise de uma conexão assíncrona de sistemas elétricos de nível de curto-circuito 2000 MVA. No programa de

fluxo de potência (ANAREDE), os sistemas elétricos equivalentes foram representados por barras de referência (100 e 200), formando duas ilhas completamente isoladas.

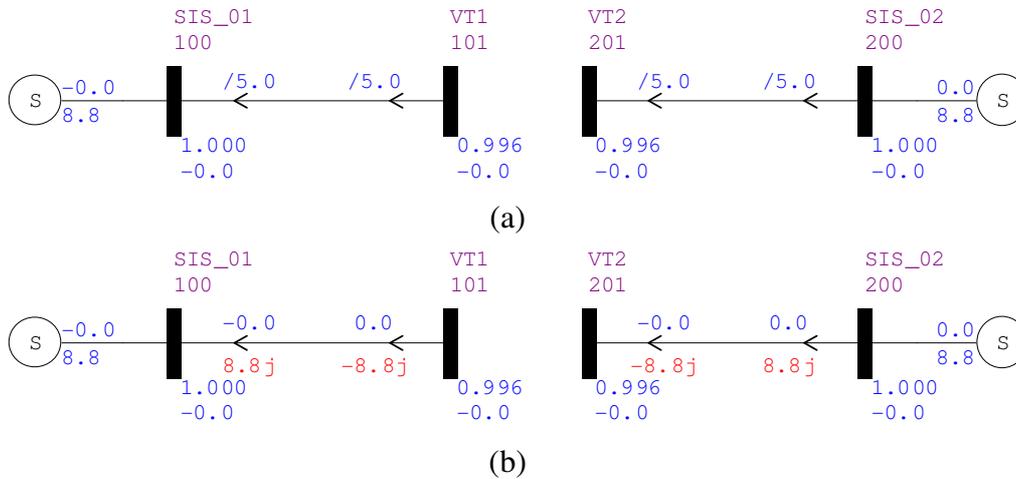


Figura 5-9: Sistema considerado no Caso 2: (a) impedâncias; (b) fluxo de potência.

A Figura 5-10 apresenta a potência ativa na interligação, considerando os seguintes degraus na referência de potência do VFT: (i) de zero para 100 MW, em  $t=10s$ ; (ii) de 100 para zero, em  $t=15s$ ; (iii) de zero para -100 MW, em  $t=20s$ ; e de -100 para zero, em  $t=25s$ .

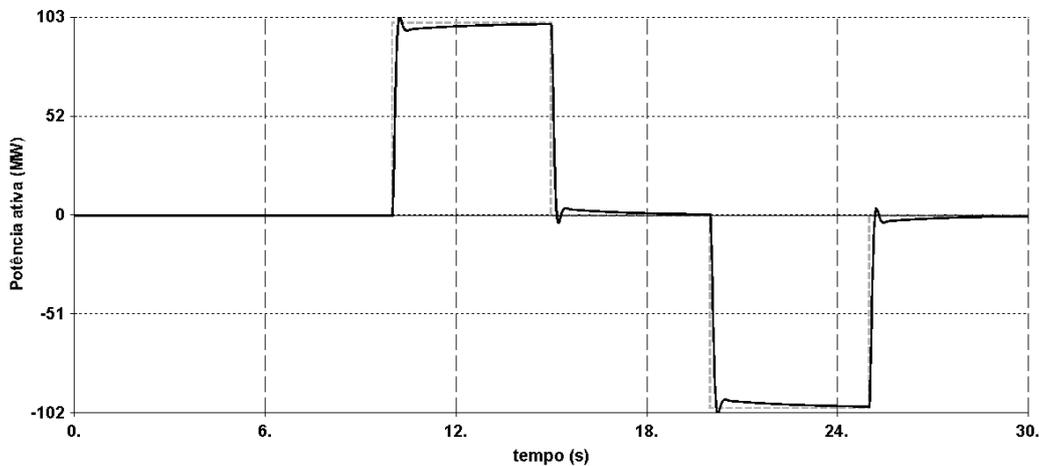


Figura 5-10: Potência de referência ( $P_{REF}$ ) e na interligação ( $P_{VFT}$ ).

A Figura 5-11 apresenta a potência reativa nas barras terminais do VFT. Observa-se que nos períodos em que a transferência de potência ativa é nula, verifica-se absorção de 18 Mvar da rede para magnetização da máquina. Nos períodos onde há transferência de potência, a absorção de potência reativa é maior em função do fenômeno da dispersão de fluxo magnético nos enrolamentos.

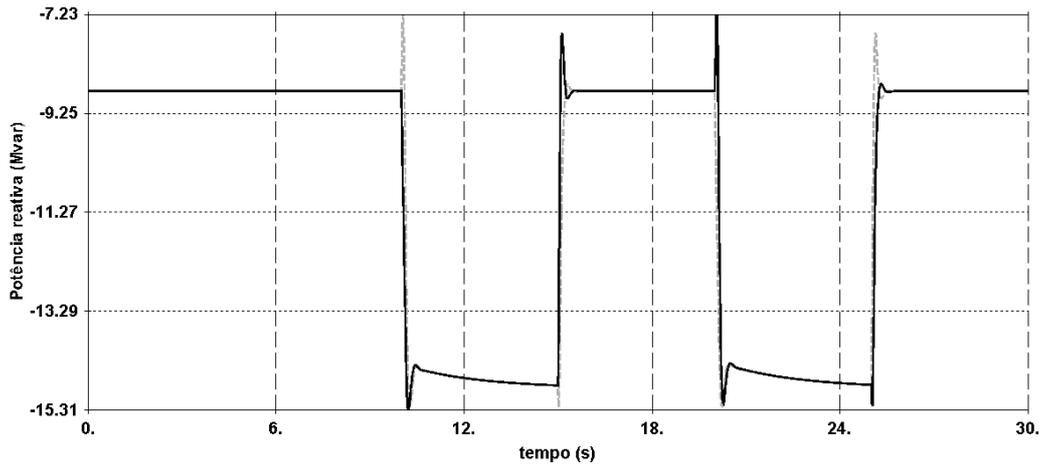


Figura 5-11: Potência reativa nos terminais de estator e rotor (em Mvar).

A Figura 5-12 apresenta o torque eletromagnético e o torque aplicado ao eixo do VFT pelo sistema de acionamento. Observa-se que o torque aplicado  $T_D$  foi limitado em  $\pm 4$  pu, através da inclusão de limitadores no controlador PI.

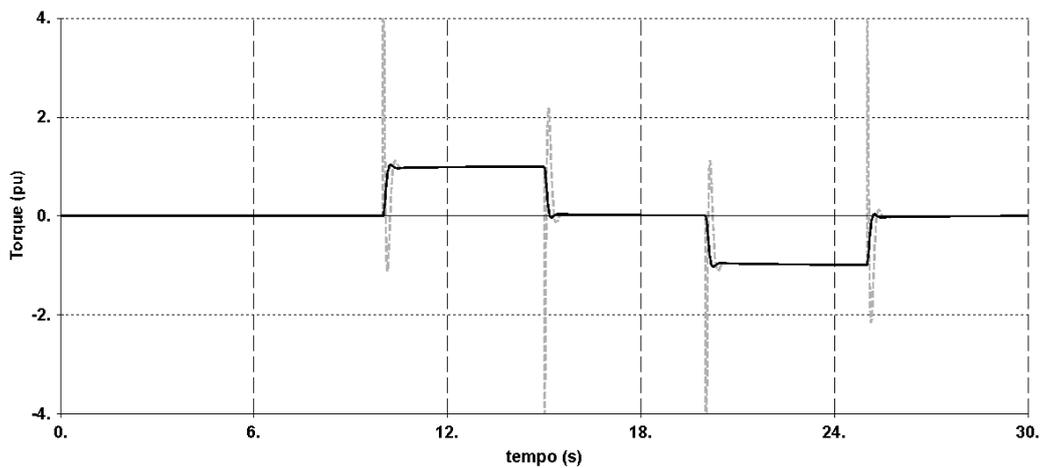


Figura 5-12: Torque eletromagnético ( $T_E$ ) e torque aplicado ( $T_D$ ).

A Figura 5-13 apresenta a defasagem angular entre os campos de estator e rotor imposta pelo VFT. A defasagem atinge  $\pm 13$  graus nos períodos de máxima transferência de potência, valor que está coerente com as características do sistema analisado nesta condição operativa.

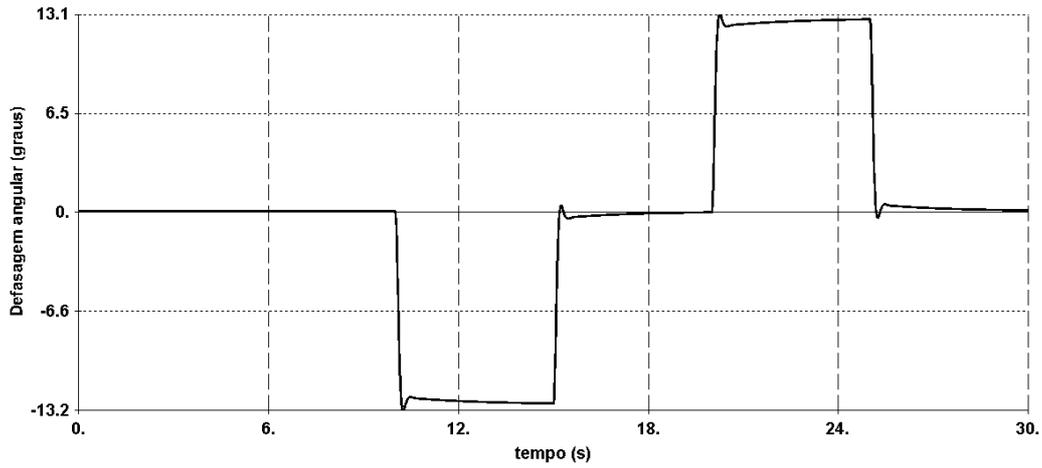


Figura 5-13: Defasagem angular  $\theta_{VFT}$  (graus).

A velocidade do rotor do VFT está apresentada na Figura 5-14. Observa-se que a velocidade da máquina é nula em regime permanente, pois não foram considerados – nesta condição operativa – desvios de frequência entre os sistemas interligados.

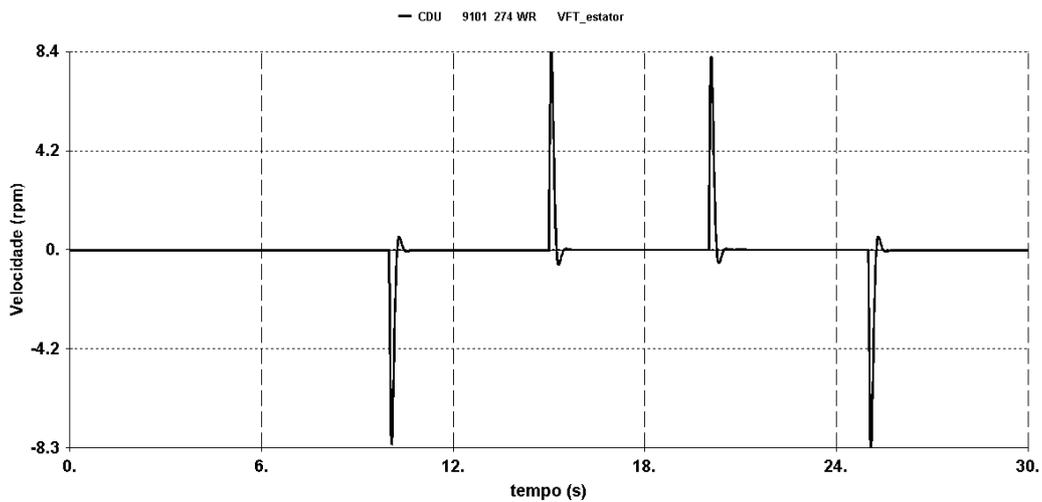


Figura 5-14: Velocidade do rotor (em rpm).

Por fim, a Figura 5-15 apresenta o perfil de tensão nos terminais de estator e rotor do VFT. Durante os períodos em que a transferência de potência é máxima, verificam-se ligeiras reduções no perfil de tensão da rede.

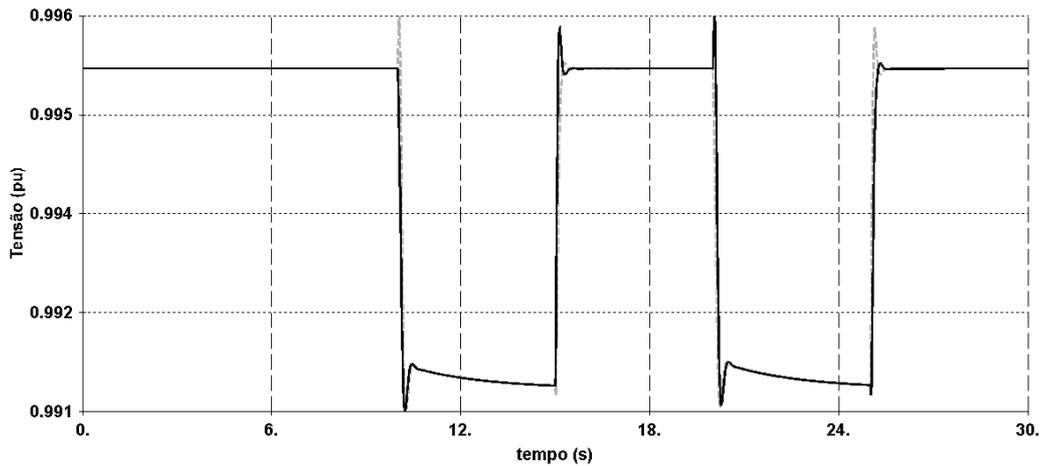


Figura 5-15: Perfil de tensão nos terminais de estator e rotor (em pu).

Observa-se que o modelo apresenta comportamento coerente com aquele esperado para o VFT. O dispositivo segue adequadamente as referências de potência e apresenta amortecimento satisfatório das oscilações de rotor.

### 5.2.3 CONEXÃO ASSÍNCRONA COM DESVIO DE FREQUÊNCIA (CASO 3)

A Figura 5-16 apresenta o sistema considerado para análise de uma conexão assíncrona de sistemas elétricos de nível de curto-circuito 2000 MVA. No programa de fluxo de potência (ANAREDE), os sistemas elétricos equivalentes foram representados por barras de referência (100 e 200), formando duas ilhas completamente isoladas.

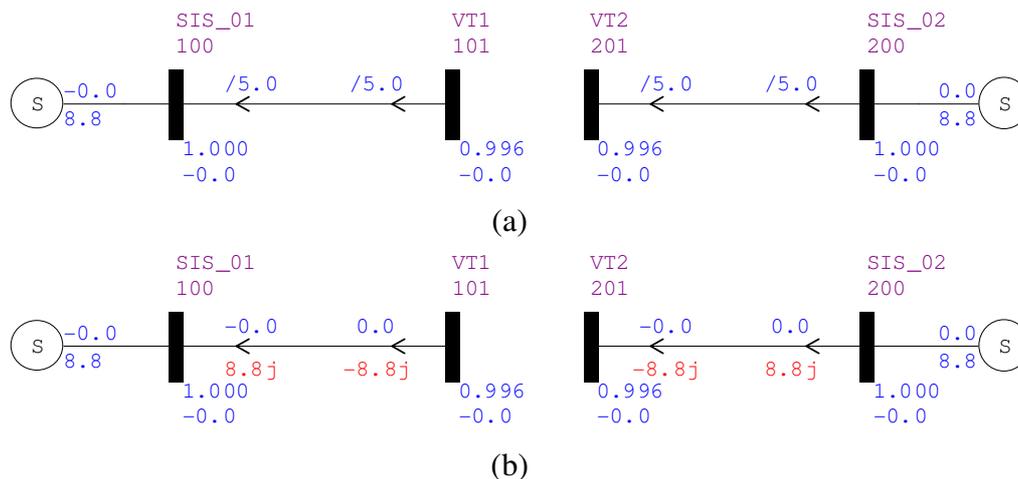


Figura 5-16: Sistema considerado no Caso 3: (a) impedâncias; (b) fluxo de potência.

Neste caso, de forma a viabilizar variações de frequência na rede elétrica, os sistemas foram representados por máquinas síncronas equivalentes, com reguladores de velocidade ajustados para operação em modo de controle de velocidade

(reguladores isócronos) e sem representação do sistema de excitação. Ressalta-se que nas simulações apresentadas nas seções anteriores a frequência não variou.

A Figura 5-17 apresenta a potência ativa na interligação, considerando os seguintes degraus na referência de potência do VFT: (i) de zero para 100 MW, em  $t=10s$ ; (ii) de 100 para 50 MW, em  $t=60s$ ; e (iii) de 50 para zero, em  $t=80s$ . Observa-se que o VFT segue corretamente a referência de potência ativa na interligação, não obstante presente ultrapassagem de cerca de 20%.

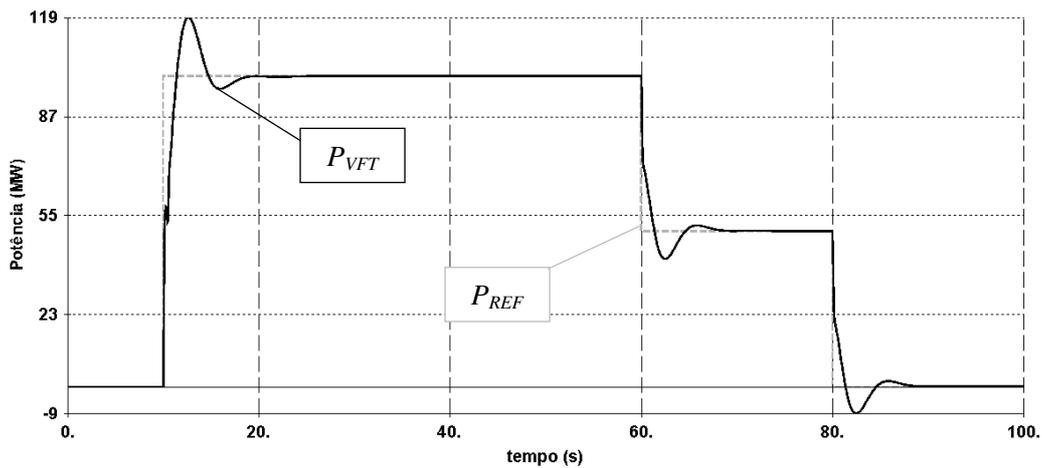


Figura 5-17: Potência de referência ( $P_{REF}$ ) e na interligação ( $P_{VFT}$ ).

A Figura 5-18 apresenta a frequência elétrica nos sistemas equivalentes interligados pelo VFT. Conforme esperado, a injeção de 100 MW de potência do Sistema 1 para o Sistema 2 produz variações transitórias na frequência de ambos os sistemas. No caso do Sistema 1, exportador, a subfrequência atinge 58,2 Hz; no Sistema 2, importador, a sobrefrequência máxima atinge 61,7 Hz.

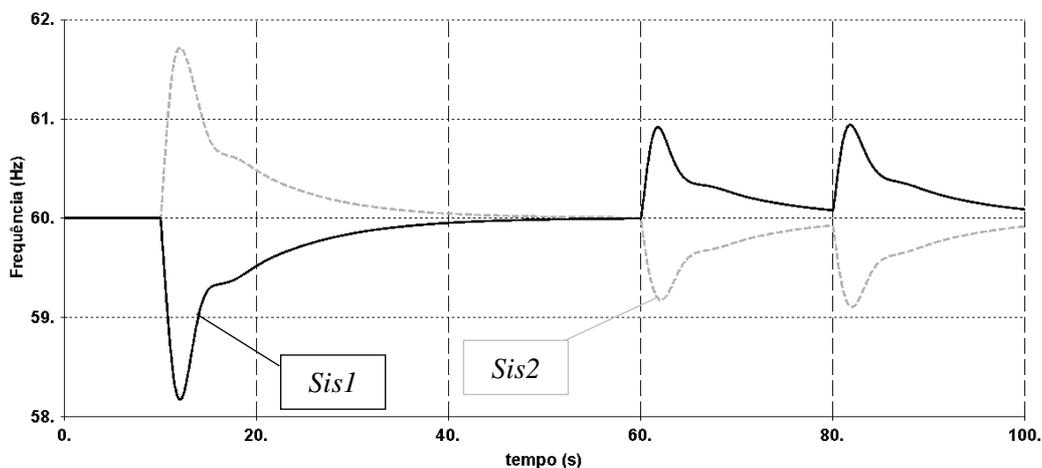


Figura 5-18: Frequência elétrica nos sistemas 1 e 2 (em Hz).

A Figura 5-19 apresenta o torque eletromagnético e o torque aplicado ao eixo do VFT pelo sistema de acionamento. Observa-se que o torque aplicado  $T_D$  foi limitado em  $\pm 3$  pu, através da inclusão de limitadores no controlador PI.

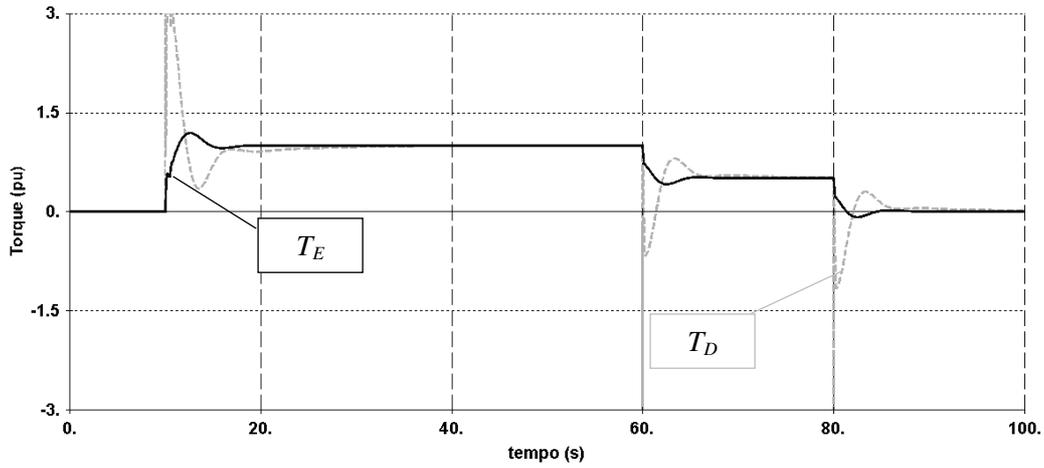


Figura 5-19: Torque eletromagnético ( $T_E$ ) e torque aplicado ( $T_D$ ).

A Figura 5-20 apresenta a defasagem angular entre os campos de estator e rotor imposta pelo VFT. A defasagem angular se estabiliza em cerca de 13 graus nos períodos de máxima transferência de potência, valor que está coerente com as características do sistema analisado nesta condição operativa.

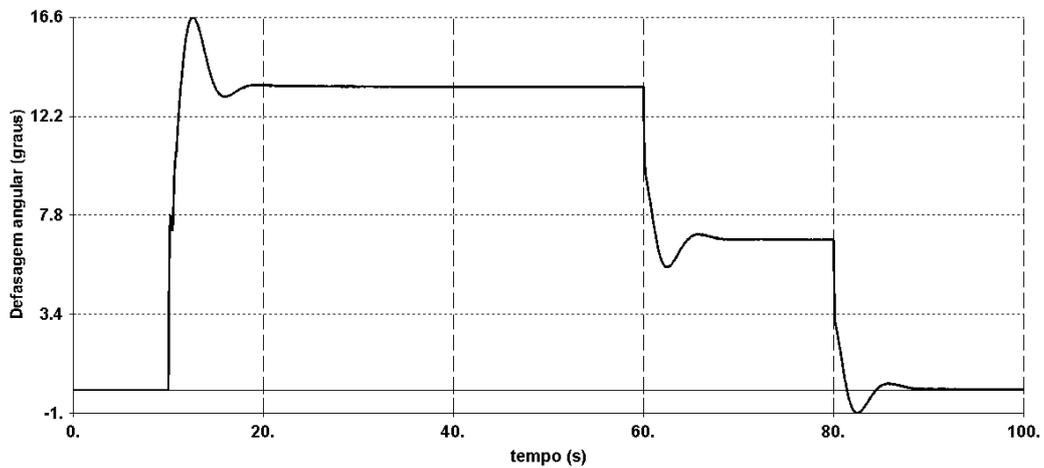


Figura 5-20: Defasagem angular  $\theta_{VFT}$  (graus).

A velocidade do rotor do VFT está apresentada na Figura 5-21. Observa-se que a velocidade do VFT atinge cerca de 100 rpm quando o desvio de frequência é máximo entre os dois sistemas elétricos.

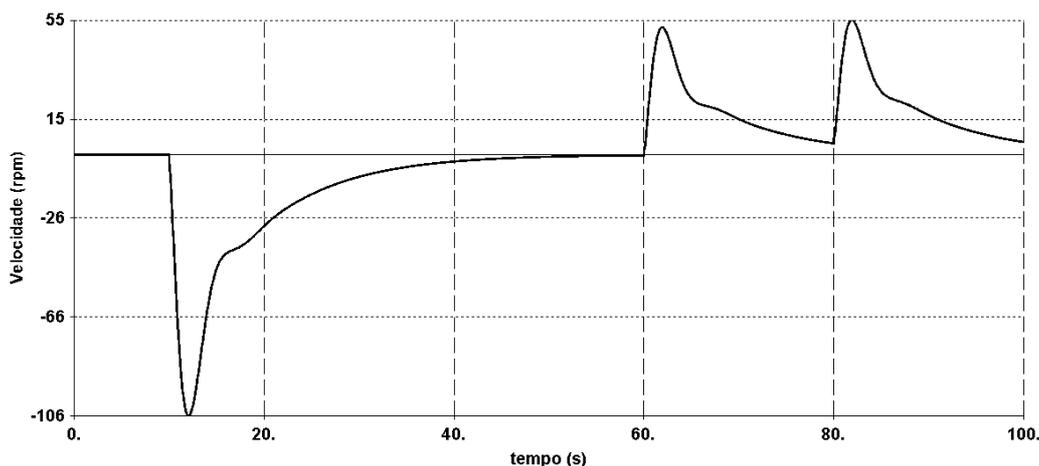


Figura 5-21: Velocidade do rotor (em rpm).

Pode-se concluir que o modelo apresenta comportamento coerente com aquele esperado para o VFT, mesmo na operação em sub ou sobrefrequência. O dispositivo segue adequadamente as referências de potência e apresenta amortecimento satisfatório das oscilações de rotor.

### 5.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou um novo modelo do VFT para simulação de transitórios eletromecânicos, desenvolvido no ANATEM. O modelo permite representar corretamente equipamentos VFT na conexão de sistemas elétricos síncronos ou assíncronos. Os resultados demonstram que o modelo responde adequadamente mesmo quando submetido a variações significativas de tensão e frequência no sistema elétrico, perturbações essas que são frequentes na rede. Esta característica do modelo viabiliza a sua utilização em simulações dinâmicas de sistemas de grande porte, como é o caso do Sistema Interligado Nacional (SIN).

O modelo permite ainda a análise da interligação de sistemas elétricos de frequência nominal diferente (50 e 60 Hz, por exemplo). De fato, o modelo não conecta fisicamente os sistemas elétricos; faz a conexão por meio de fontes de corrente que recebem sinais de referência de uma rotina computacional que representa o VFT. Esse tipo de análise – conexão de sistemas de frequência nominal distinta – não seria possível com os modelos convencionais do VFT, baseados em transformadores defasadores.

## 6 APLICAÇÕES DO TRANSFORMADOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL NO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

As características do Sistema Interligado Nacional (SIN) são tais que oferecem possibilidades para utilização do Transformador de Frequência Variável (VFT). Seria o caso, por exemplo, do sistema de escoamento de energia elétrica das usinas do Rio Madeira e sua conexão com o sistema Acre/Rondônia. Conforme será demonstrado neste capítulo, sob o ponto de vista técnico, esta conexão com o sistema Acre/Rondônia poderia ser realizada por meio de VFT, sem prejuízo para o desempenho dinâmico do SIN.

Além das possíveis aplicações no SIN, há potencial para aplicação do VFT em interligações síncronas ou assíncronas entre o Brasil e outros países do Cone Sul que adotam a frequência de 60 Hz. A Figura 6-1 apresenta a fronteira 60/60 Hz em destaque (na cor azul) e a fronteira 60/50 Hz (na cor amarela).



Figura 6-1: Fronteiras para potenciais interligações síncronas e assíncronas.

Este capítulo apresenta a análise de duas configurações do SIN nas quais foi considerada a utilização do VFT na conexão de sistemas assíncronos, de mesma

frequência nominal (60/60 Hz). As análises tiveram como foco a conexão das usinas de Santo Antônio e Jirau ao SIN e consideraram: (i) as primeiras 6 unidades geradoras da UHE Santo Antônio conectadas apenas ao Sistema Acre/Rondônia por uma estação VFT de 300 MVA; (ii) usinas de Santo Antônio e Jirau, em sua configuração final, conectadas à região Sudeste por meio de dois bipolos de corrente contínua (2 x 3.150 MW) e ao Sistema Acre/Rondônia por uma estação VFT de 500 MVA.

## 6.1 CONFIGURAÇÃO 1: CONEXÃO DA UHE SANTO ANTÔNIO AO SISTEMA ACRE/RONDÔNIA

A Figura 6-2 apresenta a configuração analisada nesta seção. Observa-se que as unidades geradoras da UHE Santo Antônio conectam-se à subestação 230 kV Porto Velho, por meio de uma estação VFT equivalente (3 x 100 MW).

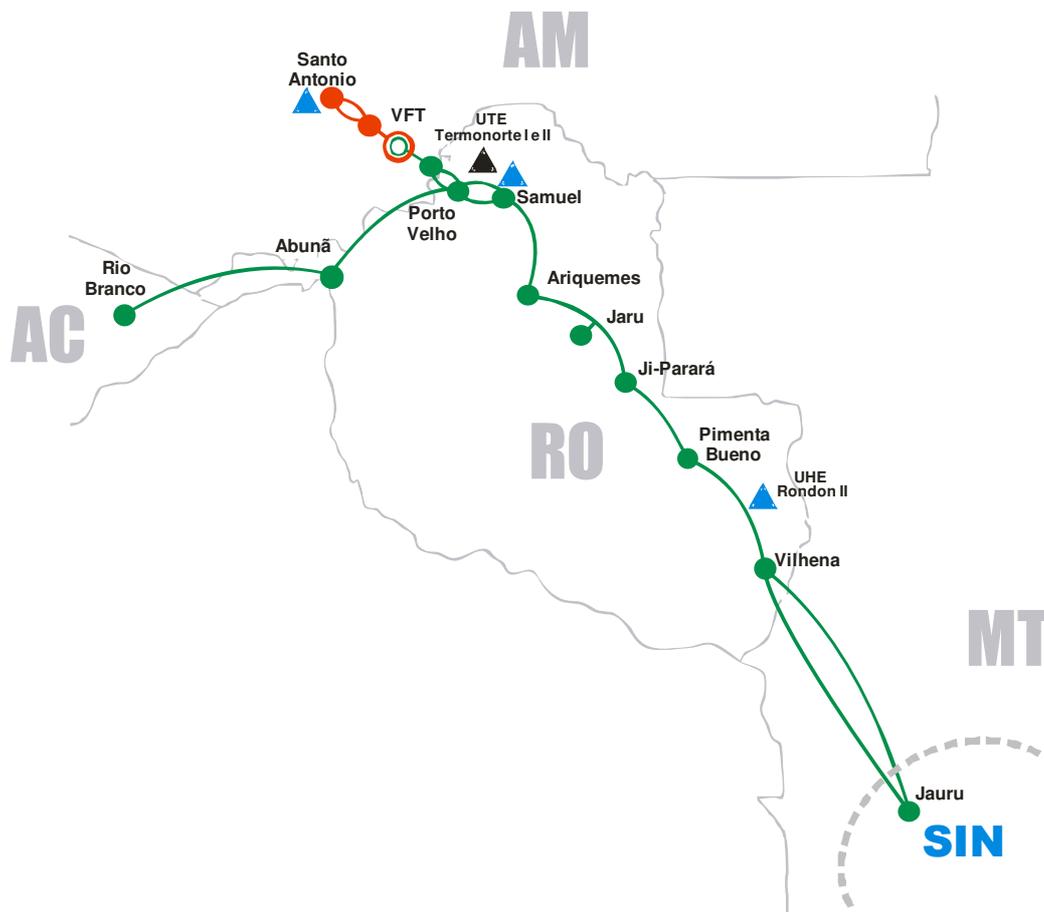


Figura 6-2: Configuração 1: UHE Santo Antônio conectadas ao Sistema Acre/Rondônia por uma estação VFT.

Ressalta-se que, nesta configuração, a interligação do Sistema Acre/Rondônia ao restante do SIN é realizada por um único circuito de 230 kV entre as subestações de

Samuel e Vilhena. Ou seja, a contingência simples de qualquer circuito neste trecho resulta na separação do Sistema Acre/Rondônia do SIN, podendo ocorrer variações significativas de frequência, dependendo dos intercâmbios programados. Adicionalmente, a perda simples de circuito no trecho Porto Velho / Abunã / Rio Branco resulta no desligamento total das cargas do Acre. Como consequência dessa perda de carga, verifica-se tendência de aceleração dos rotores das máquinas das usinas de Rondônia, com riscos de perda de sincronismo destas usinas.

A Figura 6-3 apresenta o perfil de tensão e os fluxos de potência ativa e reativa na rede de 230 kV do sistema Acre e Rondônia e UHE Santo Antônio, considerando – inicialmente – intercâmbio nulo entre os sistemas. A geração total na UHE Santo Antônio foi ajustada em 240 MW, suprindo inicialmente cargas locais. Esta estratégia foi necessária para inicialização da simulação dinâmica, descrita na próxima seção. A figura apresenta em destaque o VFT e o ponto de conexão entre os sistemas.

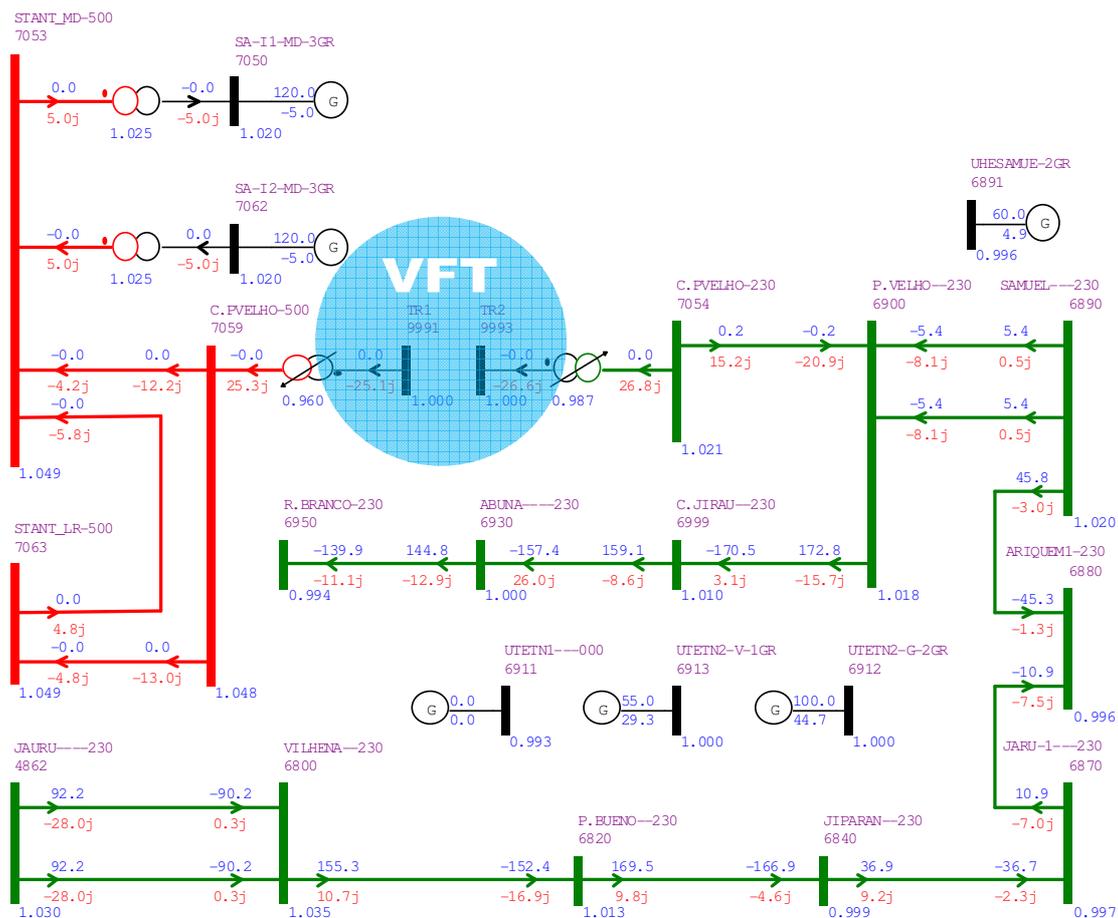


Figura 6-3: Configuração 1: Perfil de tensão, fluxos de potência ativa e reativa.

As próximas seções apresentam o processo utilizado para inicialização das simulações dinâmicas, bem como simulações de contingências na rede.

### 6.1.1 INICIALIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO DINÂMICA

Não obstante tenha sido desenvolvido um modelo digital do VFT para simulação de transitórios eletromecânicos no ANATEM, não foi possível implementar um modelo equivalente para o programa ANAREDE (fluxo de potência). De fato, para o caso do ANAREDE, a inclusão de novos modelos só será possível através da alteração de seu código fonte, o que só pode ser feito pelos desenvolvedores do programa.

Em face dessas dificuldades, a inicialização de cada simulação dinâmica demandou esforço considerável, envolvendo as seguintes etapas principais:

- i. Ajuste do caso base de fluxo de potência, com valores de injeção de potência reativa nas barras de fronteira compatíveis com as características do VFT (corrente de magnetização);
- ii. Ajuste do caso base com fluxo de potência ativa nulo pelo VFT. A inicialização com fluxo de potência ativa diferente de zero é possível, mas necessita da inicialização da defasagem angular imposta pelo VFT com valor diferente de zero, o que complica ainda mais o processo;
- iii. Conexão de barras auxiliares nas barras de fronteira com o VFT de forma a facilitar o processo de inicialização. Estas barras auxiliares permitiram estabelecer referências precisas de ângulo e tensão nas barras de fronteira do VFT, na simulação de fluxo de potência, viabilizando o processo de inicialização das variáveis de estado do modelo na simulação dinâmica;
- iv. Na simulação dinâmica, desconexão das barras auxiliares, aplicação de degrau na referência do VFT e remoção das cargas fictícias. No caso da simulação apresentada nesta seção, considerou-se um degrau de 0 para 240 MW;
- v. Gravação de arquivo *snapshot* do ANATEM após 108 s de simulação, tempo suficiente para conduzir o sistema ao regime permanente;

- vi. Posteriormente, as simulações das contingências foram precedidas da leitura do arquivo *snapshot*.

A inicialização do sistema e do VFT está ilustrada na Figura 6-4, que apresenta a potência ativa e reativa no rotor do VFT, após degrau na referência do VFT.

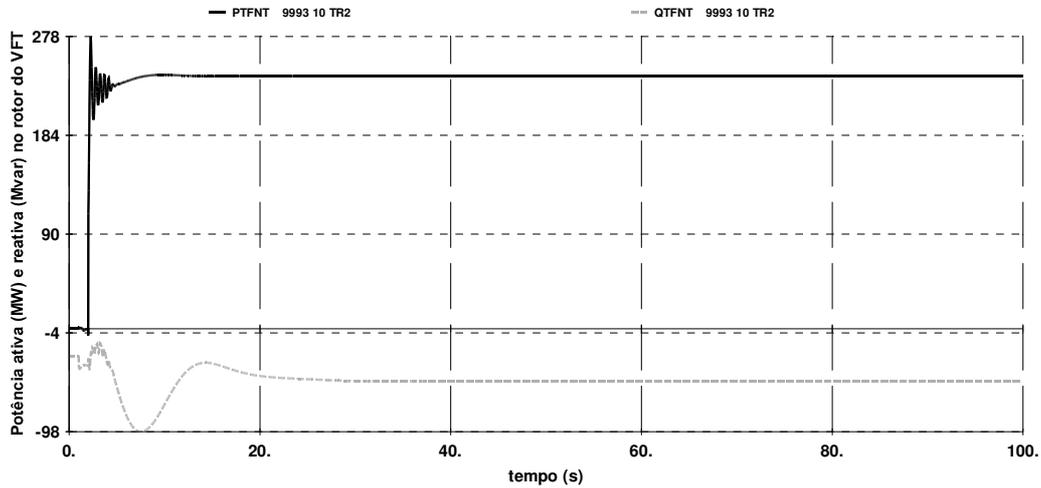


Figura 6-4: Inicialização do sistema e do VFT: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no rotor do VFT.

### 6.1.2 CONTINGÊNCIA 1: CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO NA SE PORTO VELHO

Esta seção apresenta resultados da simulação de um curto-circuito monofásico na SE Porto Velho, eliminado em 150 ms. Para esta contingência, as tensões nas subestações Porto Velho e Coletora Porto Velho 230 kV estão ilustradas na Figura 6-5. Observa-se que a tensão de sequência positiva na subestação Porto Velho atinge 70%.

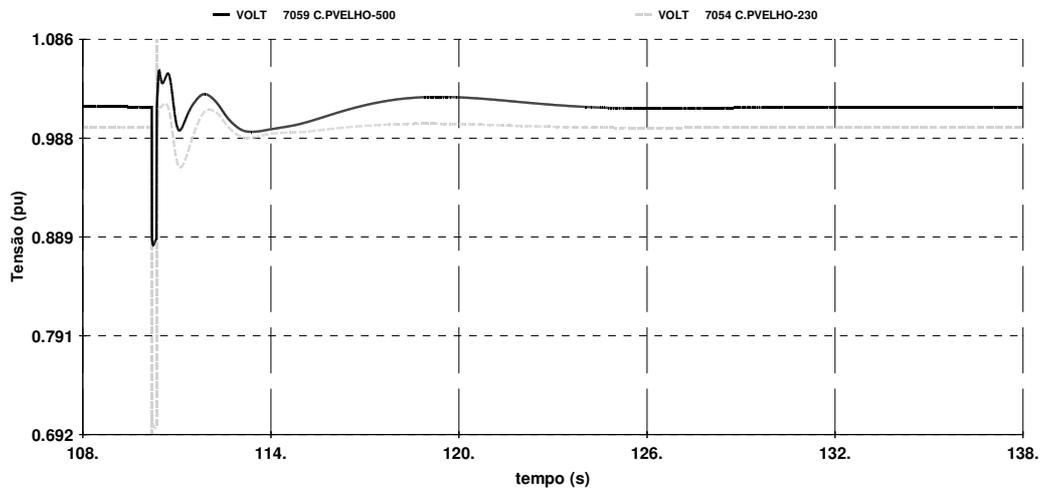


Figura 6-5: Contingência 1: Tensão na SE Coletora Porto Velho 500 kV e na SE Porto Velho 230 kV (em pu).

A Figura 6-6 apresenta a frequência elétrica nas unidades geradoras das usinas de Santo Antônio e Samuel. Observa-se que as variações de frequência nas máquinas são inferiores a 0,35 Hz.

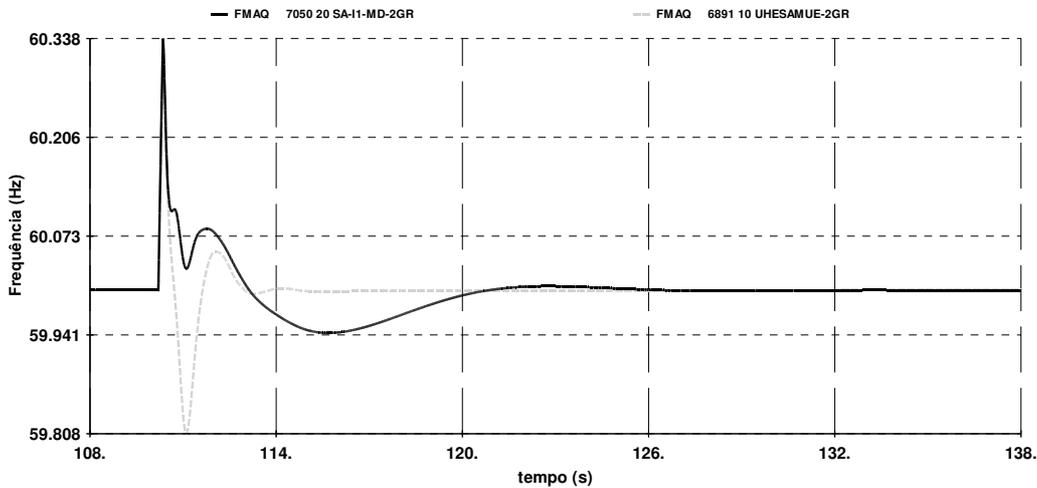


Figura 6-6: Contingência 1: Frequência nas unidades geradoras da UHE Santo Antônio e UHE Samuel (em Hz).

A Figura 6-7 apresenta a potência ativa que flui pelo VFT na interligação, bem como o valor de referência utilizado pelo sistema de controle (240 MW, neste caso). Como esperado, o curto-circuito produz variações transitórias na potência que flui pelo VFT. Observa-se, no entanto, que o VFT apresenta comportamento estável e que o fluxo de potência na interligação retorna ao valor original cerca de 500 ms após a eliminação do curto-circuito.

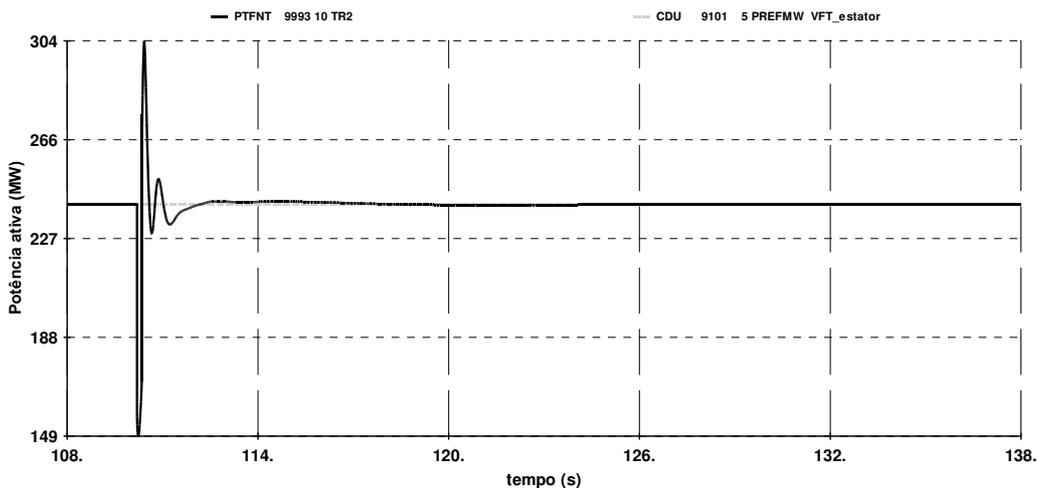


Figura 6-7: Contingência 1: Potência ativa de referência e Potência no VFT (em MW).

A Figura 6-8 apresenta a potência ativa e reativa nos enrolamentos do estator do VFT. Observa-se que a potência ativa no estator é negativa, indicando que a

potência vai do sistema elétrico para o estator do VFT (convenção de gerador). A potência reativa também é negativa e indica que o VFT absorve potência reativa da rede elétrica, como esperado.

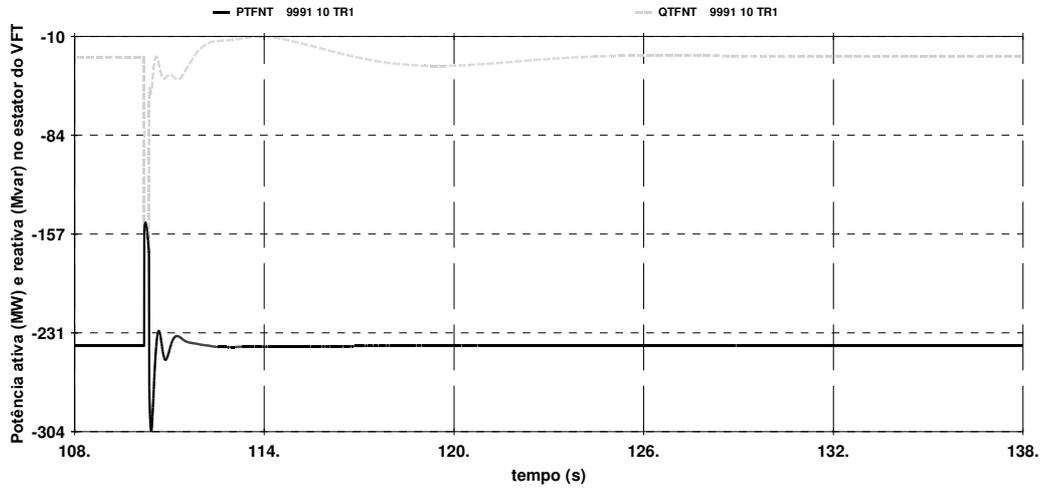


Figura 6-8: Contingência 1: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no estator do VFT.

A Figura 6-9 apresenta a potência ativa nos enrolamentos do rotor do VFT. Observa-se que a potência ativa no rotor é positiva, indicando que a potência vai do rotor do VFT para o sistema (convenção de gerador).

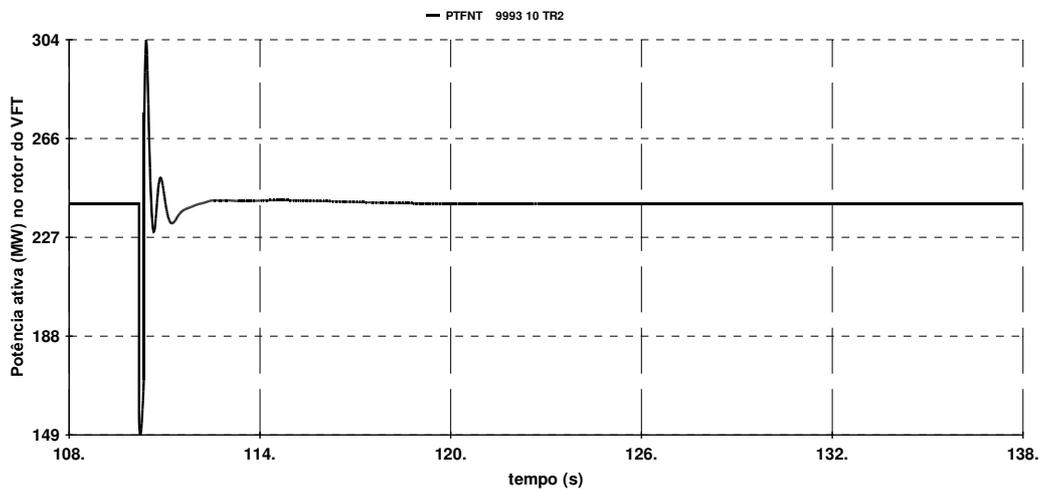


Figura 6-9: Contingência 1: Potência ativa (em MW) no rotor do VFT.

A Figura 6-10 apresenta a potência reativa nos enrolamentos do rotor do VFT. Da mesma forma que no estator, o VFT absorve potência reativa da rede elétrica pelos terminais do rotor.

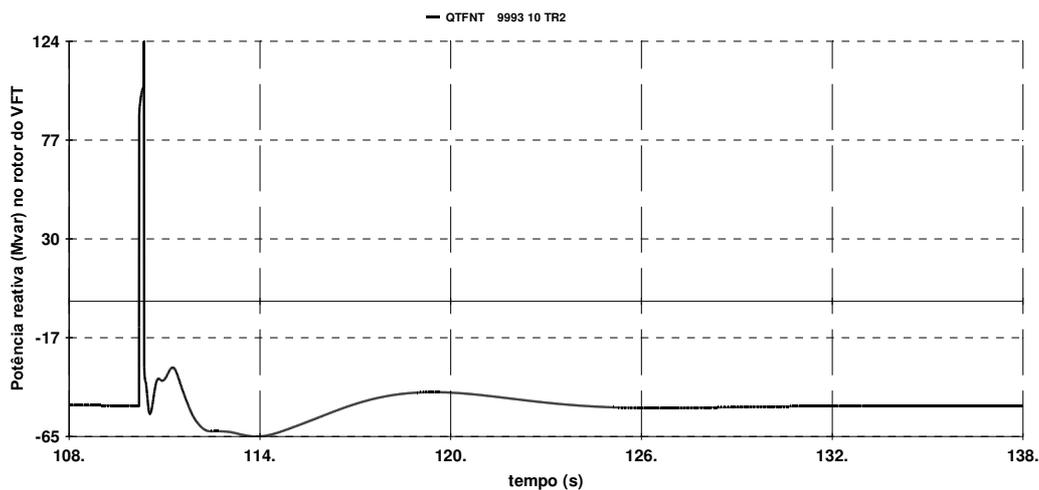


Figura 6-10: Contingência 1: Potência reativa (em Mvar) no rotor do VFT.

A velocidade do rotor do VFT está apresentada na Figura 6-11. Observa-se que o rotor gira em ambos os sentidos, atingindo a velocidade máxima de 6 rpm logo após a eliminação do curto-circuito.

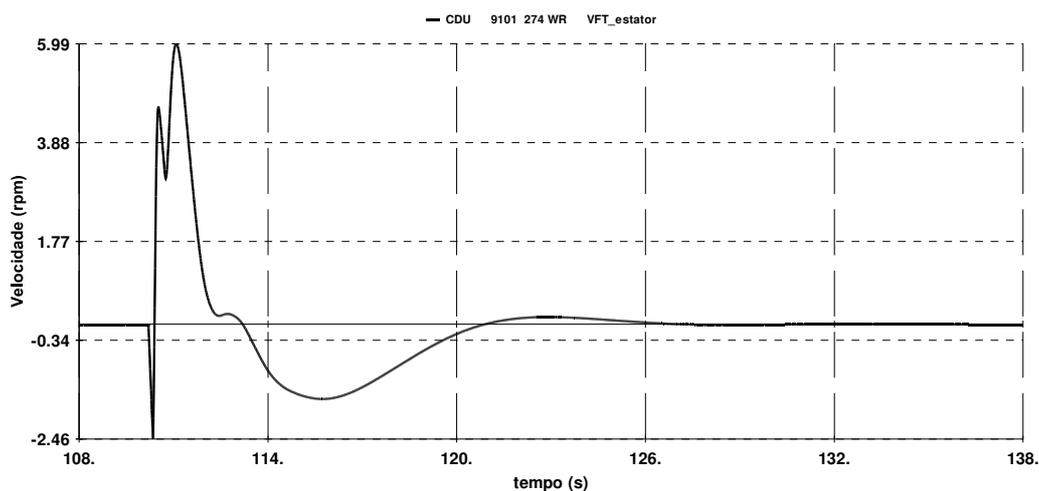


Figura 6-11: Contingência 1: Velocidade do rotor do VFT (em rpm).

A Figura 6-12 apresenta a defasagem angular entre os rotores das UHE Santo Antônio e Samuel e a defasagem angular imposta pelo VFT. Observa-se que o sistema é estável, não havendo indicação de qualquer prejuízo dinâmico para o sistema.

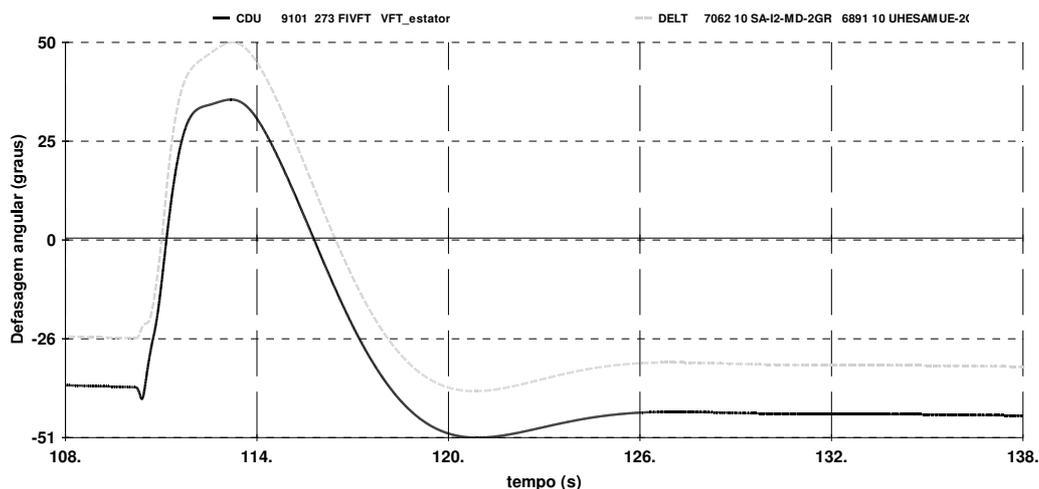


Figura 6-12: Contingência 1: Defasagem angular entre os rotores das UHE Santo Antônio e Samuel e Defasagem angular no VFT (em graus).

### 6.1.3 CONTINGÊNCIA 2: CURTO-CIRCUITO NA SE PORTO VELHO, ELIMINADO PELA ABERTURA DA LT 230 kV PORTO VELHO/ABUNÃ

Esta seção apresenta resultados da simulação de um curto-circuito na SE Porto Velho, eliminado em 150 ms através da abertura da LT 230 kV Porto Velho/Abunã. Para esta contingência, as tensões nas subestações de Porto Velho e Ariquemes estão apresentadas na Figura 6-13. Observa-se que a tensão de sequência positiva na subestação Ariquemes atinge cerca de 60% na primeira oscilação, indicando que a contingência é bastante severa sob o ponto de vista da dinâmica do sistema elétrico.

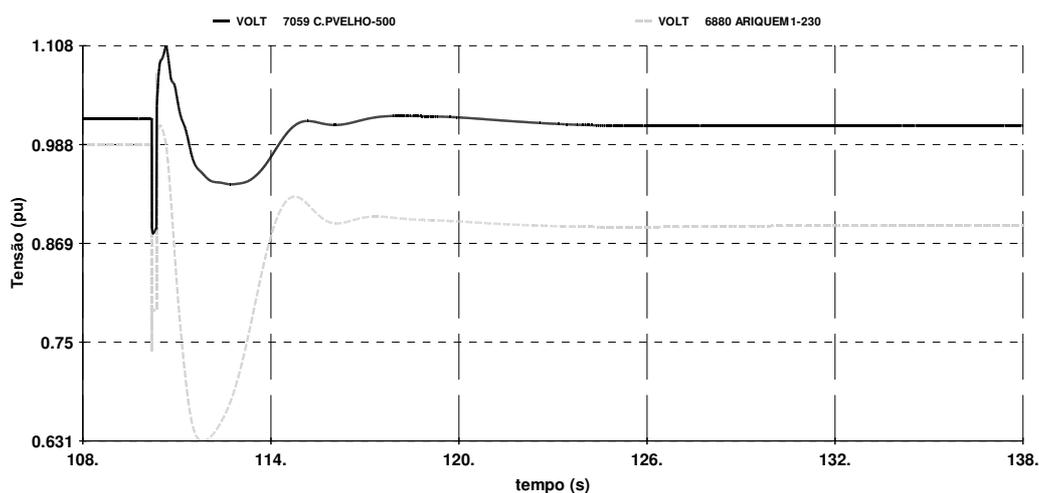


Figura 6-13: Contingência 2: Tensão na SE Coletora Porto Velho 500 kV e na SE Porto Velho 230 kV (em pu).

A Figura 6-14 apresenta a frequência elétrica nas unidades geradoras das usinas de Santo Antônio e Samuel. Observa-se que as variações de frequência nas máquinas são inferiores a 0,4 Hz.

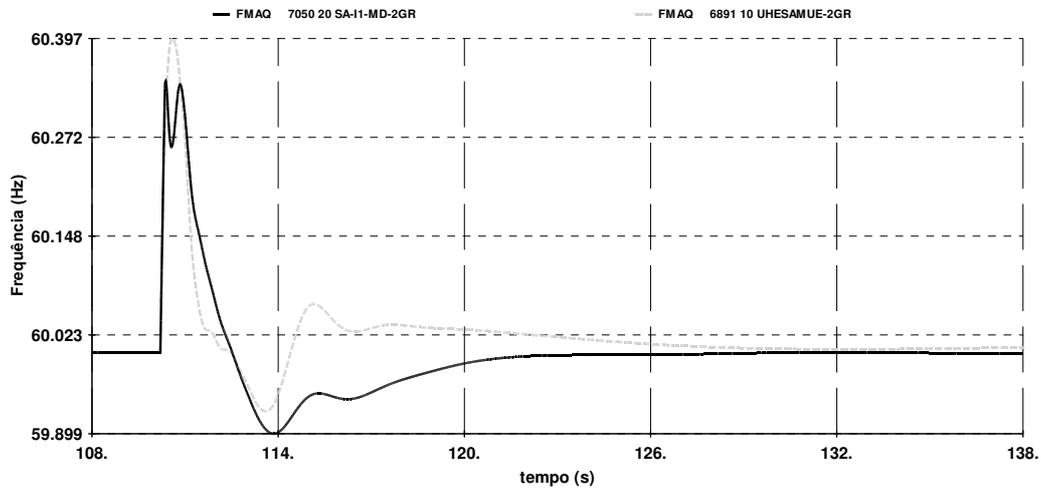


Figura 6-14: Contingência 2: Frequência nas unidades geradoras da UHE Santo Antônio e UHE Samuel (em Hz).

A Figura 6-15 apresenta a potência ativa que flui pelo VFT na interligação, bem como o valor de referência utilizado pelo sistema de controle (240 MW). A contingência produz variações transitórias na potência que flui pelo VFT. No entanto, o VFT apresenta comportamento estável e o fluxo de potência na interligação retorna ao valor de referência.

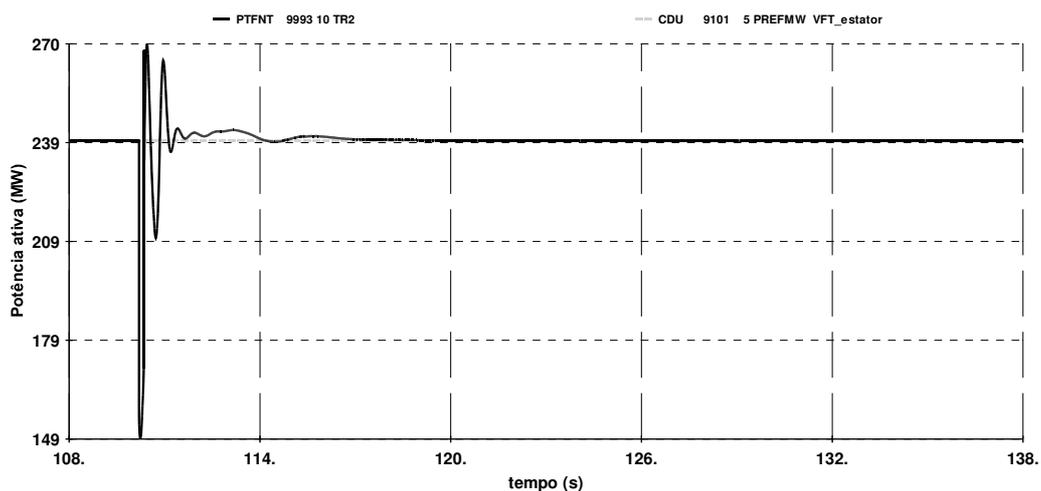


Figura 6-15: Contingência 2: Potência ativa de referência e Potência no VFT (em MW).

A Figura 6-16 e a Figura 6-17 apresentam a potência ativa e reativa nos enrolamentos do estator e rotor do VFT, respectivamente. Observa-se que a potência

ativa no estator é negativa, indicando que a potência vai do sistema para o estator do VFT. Naturalmente, no rotor a potência ativa é positiva, pois vai do VFT para o sistema. Observa-se, ainda, que a potência reativa é negativa em ambos os terminais, o que indica que o VFT absorve potência reativa da rede elétrica, como esperado.

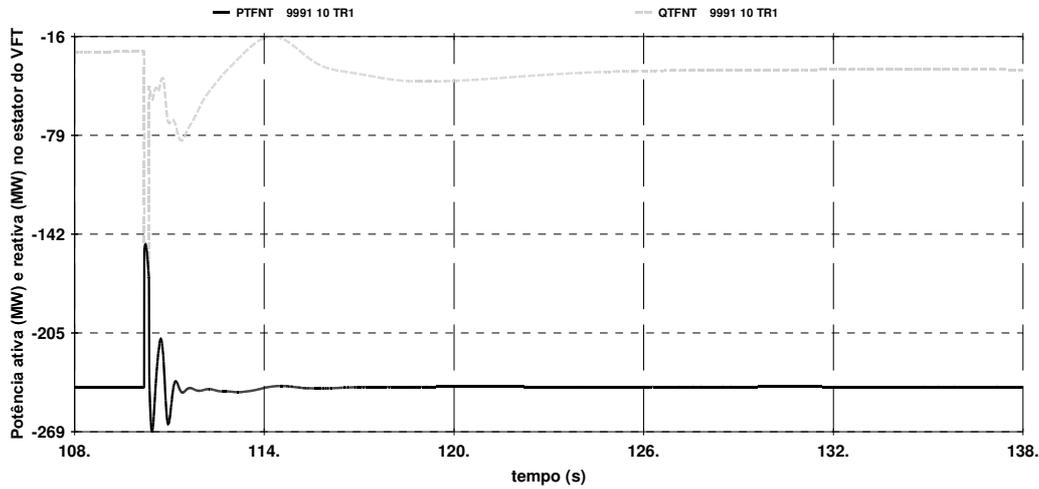


Figura 6-16: Contingência 2: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no estator do VFT.

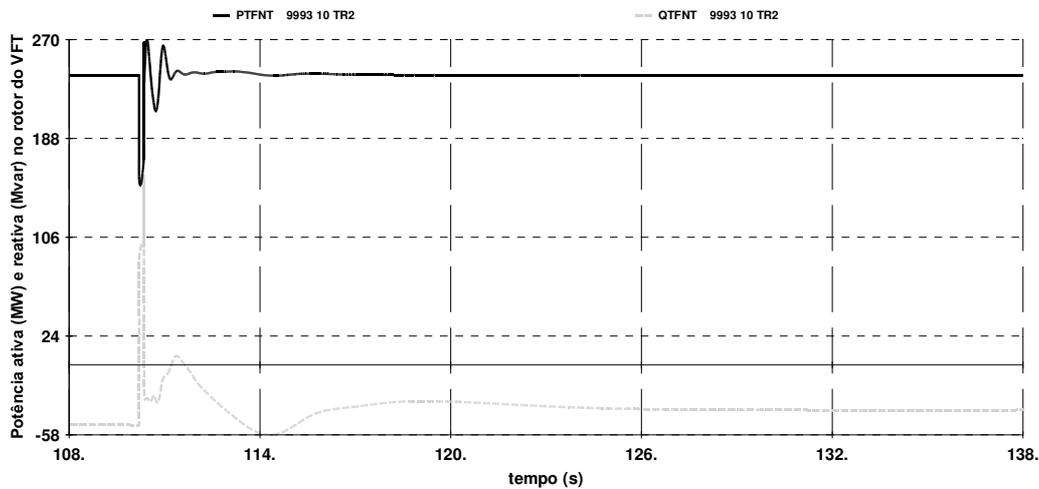


Figura 6-17: Contingência 2: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no rotor do VFT.

Para a Contingência 2, a velocidade do rotor do VFT está apresentada na Figura 6-18. Observa-se que o rotor gira em ambos os sentidos e atinge a velocidade máxima de 8 rpm.

A Figura 6-19 apresenta a defasagem angular entre os rotores das UHE Santo Antônio e TermoNorte 2 e o centro de massa. Observa-se que o sistema é estável, mas são grandes as excursões angulares, o que indica a alta severidade da contingência.

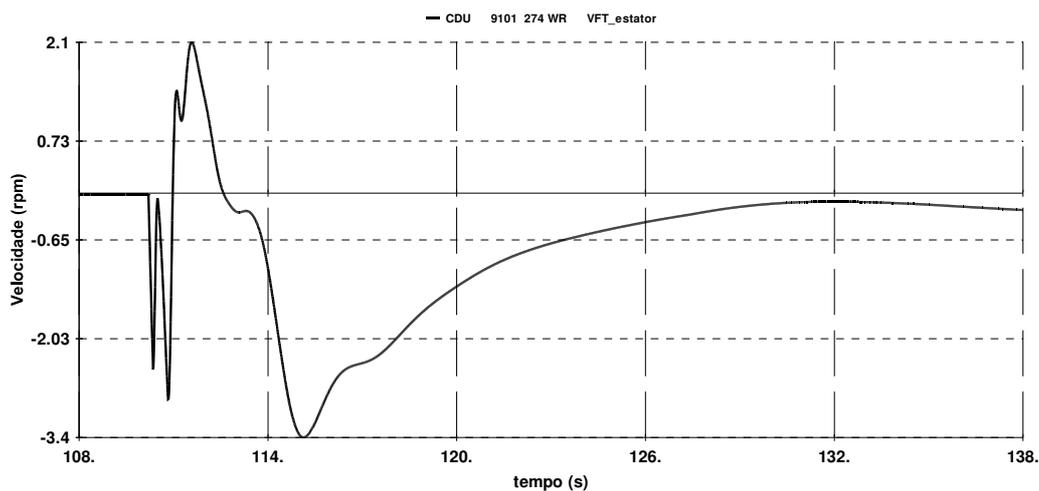


Figura 6-18: Contingência 2: Velocidade do rotor do VFT (em rpm).

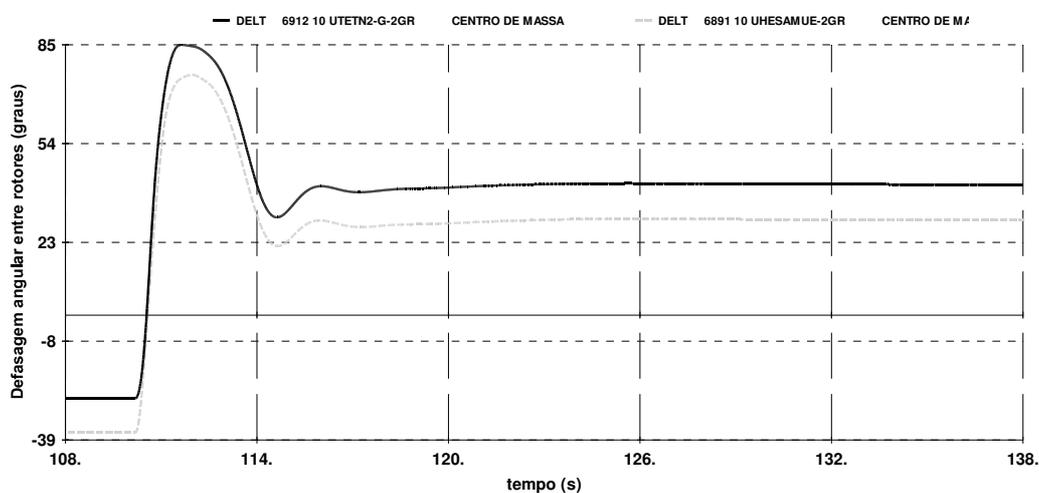


Figura 6-19: Contingência 2: Defasagem angular entre os rotores das unidades geradoras das UTE Termonorte e UHE Samuel (em graus).

Como conclusão, a contingência da LT 230 kV Porto Velho/Abunã é bastante severa para o Sistema Acre/Rondônia, pois constitui uma rejeição de quase 200 MW de carga. De fato, para as condições analisadas, há risco de perda de sincronismo das unidades geradoras das UHE Samuel e UTE Termonorte, conforme apresentado anteriormente.

Conforme será ilustrado na próxima seção, o VFT pode atuar no sentido de melhorar o desempenho dinâmico do sistema nesta contingência.

### 6.1.4 CONTINGÊNCIA 3: CURTO-CIRCUITO NA SE PORTO VELHO, ELIMINADO COM A ABERTURA DA LT 230 kV PORTO VELHO/ABUNÃ, SEGUIDO DE REDUÇÃO DA ORDEM DE POTÊNCIA NO VFT

Esta seção apresenta resultados da simulação de um curto-circuito na SE Porto Velho (tensão de sequência positiva de 60%), eliminado em 150 ms através da abertura da LT 230 kV Porto Velho/Abunã e com redução automática da ordem de potência do VFT (de 240 para 190 MW) após 200 ms da eliminação do defeito.

A Figura 6-20 apresenta a tensão de sequência positiva na subestação de Ariquemes, considerando a perda da LT 230 kV Porto Velho/Abunã, com ou sem redução de potência no VFT. Observa-se que a redução automática da potência no VFT atenua as consequências da contingência, elevando o perfil de tensão na primeira oscilação de 60 para cerca de 80%.

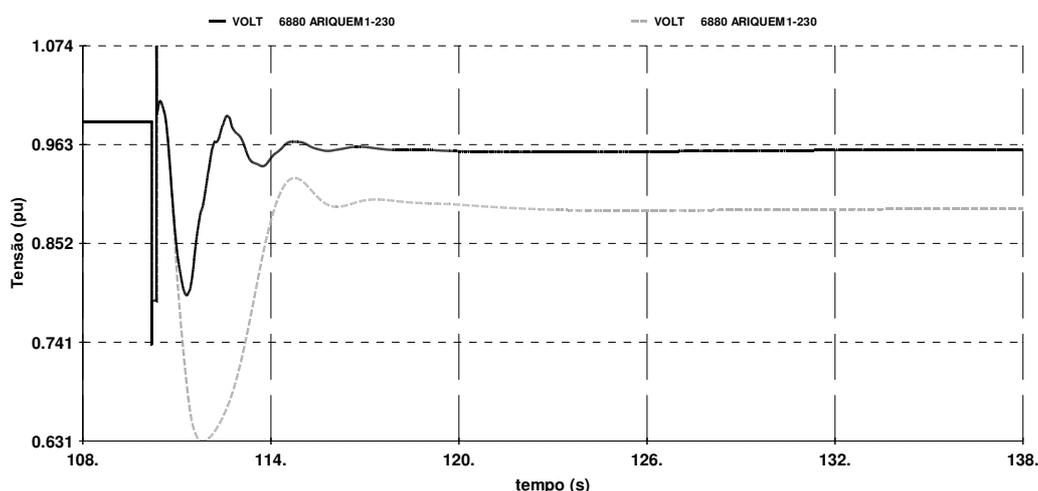


Figura 6-20: Contingência 3: Tensão na SE Ariquemes 230 kV (em pu) – comparação Com e Sem Redução da Ordem de Potência no VFT.

A Figura 6-21 apresenta a frequência elétrica nas unidades geradoras das usinas de Santo Antônio e Samuel, considerando a perda da LT 230 kV Porto Velho/Abunã com redução automática da ordem no VFT (-50 MW). Observa-se que a redução do fluxo de potência pelo VFT provoca sobrefrequência nas unidades geradoras da UHE Santo Antônio, que atingem a frequência máxima de 61,6 Hz, sem risco de desligamento por atuação de suas proteções intrínsecas.

A Figura 6-22 apresenta a potência elétrica gerada pelas unidades geradoras da UHE Santo Antônio (grupos 1 e 2).

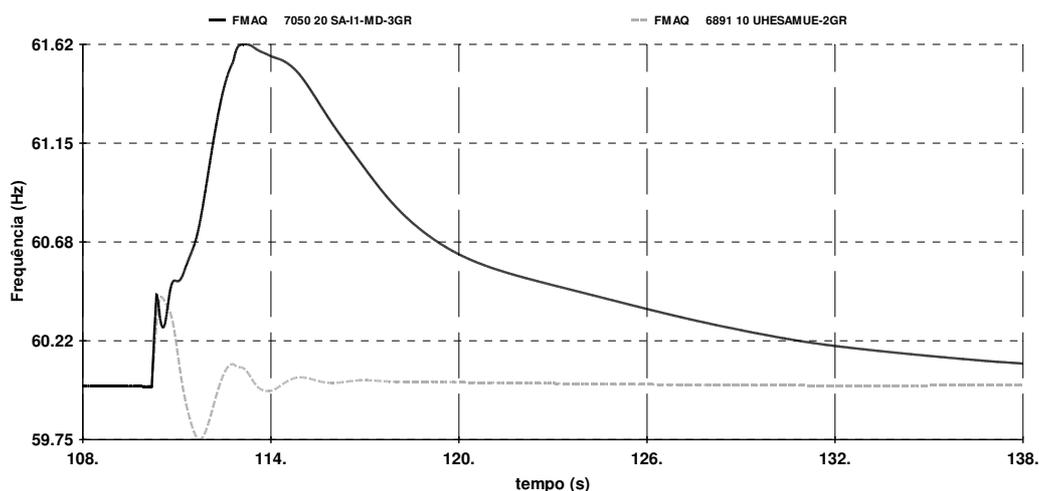


Figura 6-21: Contingência 3: Frequência nas unidades geradoras da UHE Santo Antônio e UHE Samuel (em Hz).

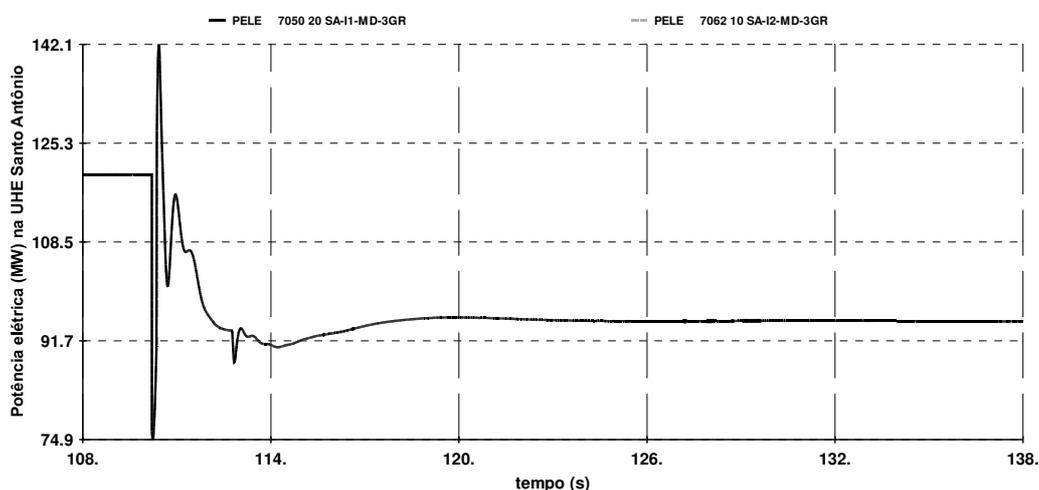


Figura 6-22: Contingência 3: Potência elétrica (em MW) nas máquinas da UHE Santo Antônio [grupos 1 e 2].

A Figura 6-23 apresenta a potência ativa que flui pelo VFT na interligação, bem como o valor de referência utilizado pelo sistema de controle, que passa de 240 para 190 MW. Observa-se que o VFT segue adequadamente a referência de potência na interligação, promovendo redução de 50 MW.

A Figura 6-24 e a Figura 6-25 apresentam a potência ativa e reativa nos enrolamentos do estator e rotor do VFT, respectivamente. Observa-se que a potência ativa no estator é negativa, indicando que a potência vai do sistema para o estator do VFT. No rotor a potência ativa é positiva, pois vai do VFT para o sistema. Observa-se, ainda, que a potência reativa é negativa em ambos os terminais, o que indica que o VFT absorve potência reativa da rede elétrica, como esperado.

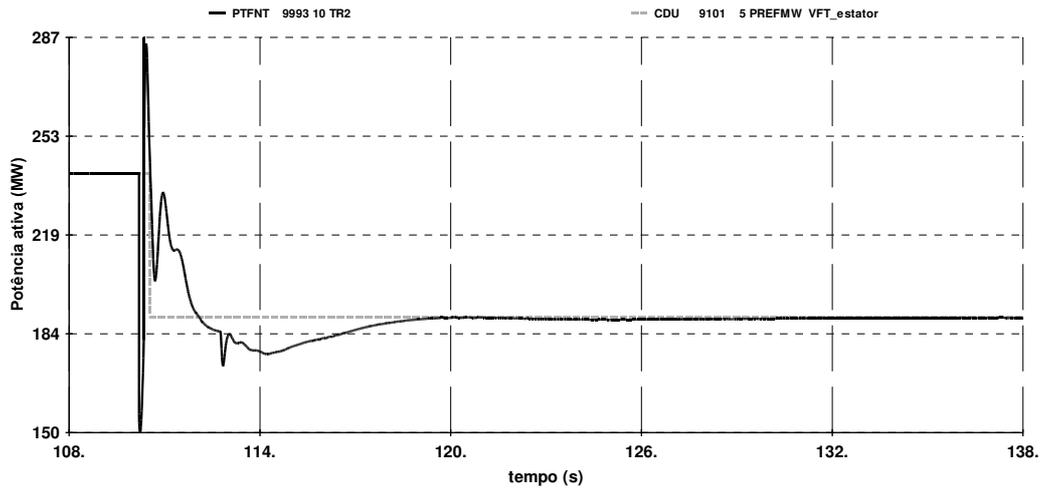


Figura 6-23: Contingência 3: Potência ativa de referência e Potência no VFT (em MW).

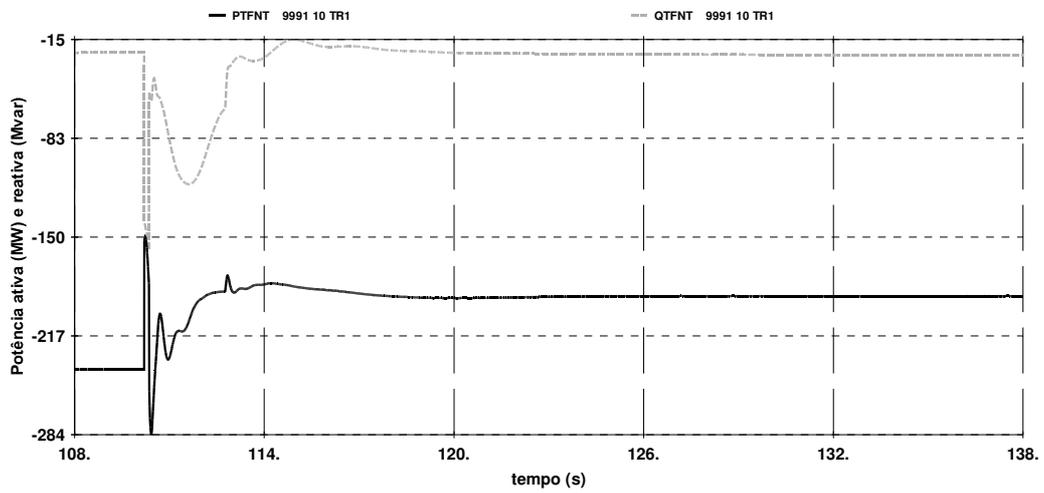


Figura 6-24: Contingência 3: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no estator do VFT.

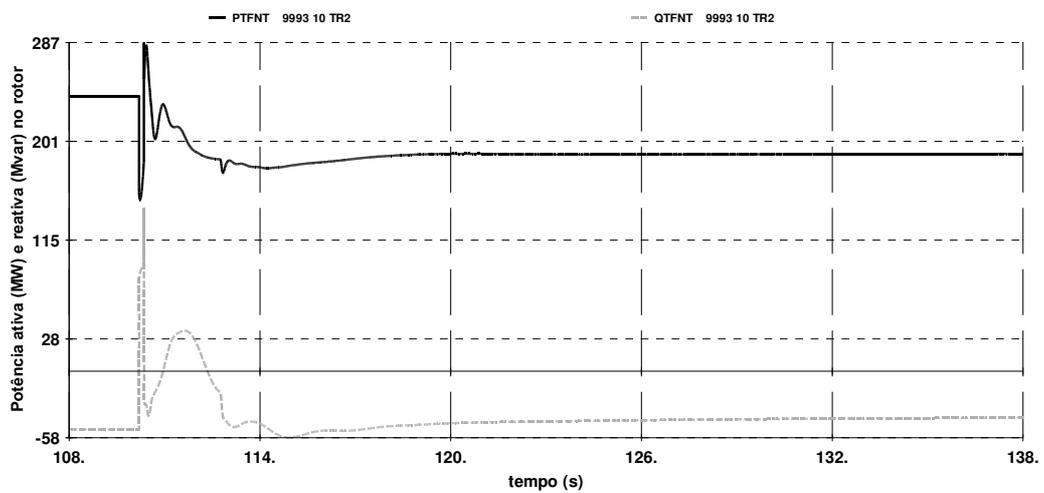


Figura 6-25: Contingência 3: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no rotor do VFT.

A Figura 6-26 apresenta a potência mecânica no eixo do VFT. Observa-se que a potência mecânica assume valores diferentes de zero nos períodos em que o rotor do VFT gira, como decorrência da diferença de frequência entre os sistemas interligados.

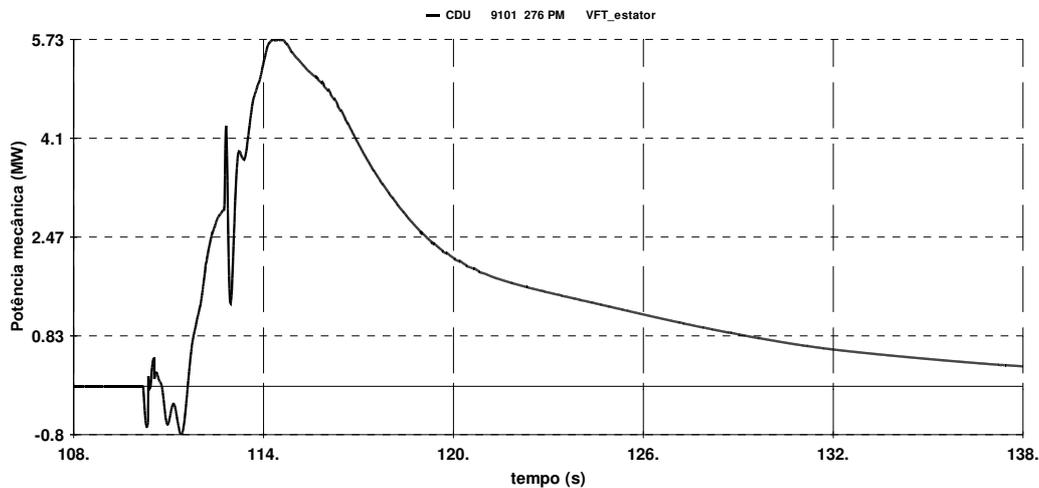


Figura 6-26: Contingência 3: Potência mecânica no eixo do VFT (MW).

A velocidade do rotor do VFT está apresentada na Figura 6-27. Observa-se que o rotor gira após a contingência, atingindo a velocidade máxima de 48 rpm.

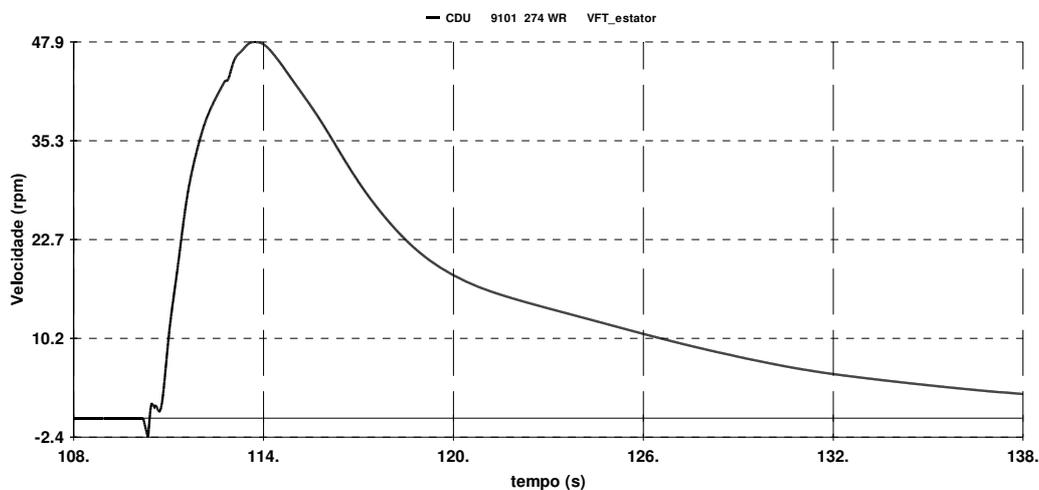


Figura 6-27: Contingência 3: Velocidade do rotor do VFT (em rpm).

A Figura 6-28 apresenta a defasagem angular entre os rotores da usina TermoNorte 2 e o centro de massa, considerando a redução automática de potência no VFT (de 240 para 190 MW) ou não. Observa-se que a redução de potência ativa promovida pelo VFT é benéfica para o desempenho dinâmico do sistema. De fato, houve redução expressiva da defasagem angular máxima entre os rotores (-20 graus) e elevação dos níveis de tensão observados no primeiro *swing* (+20%).

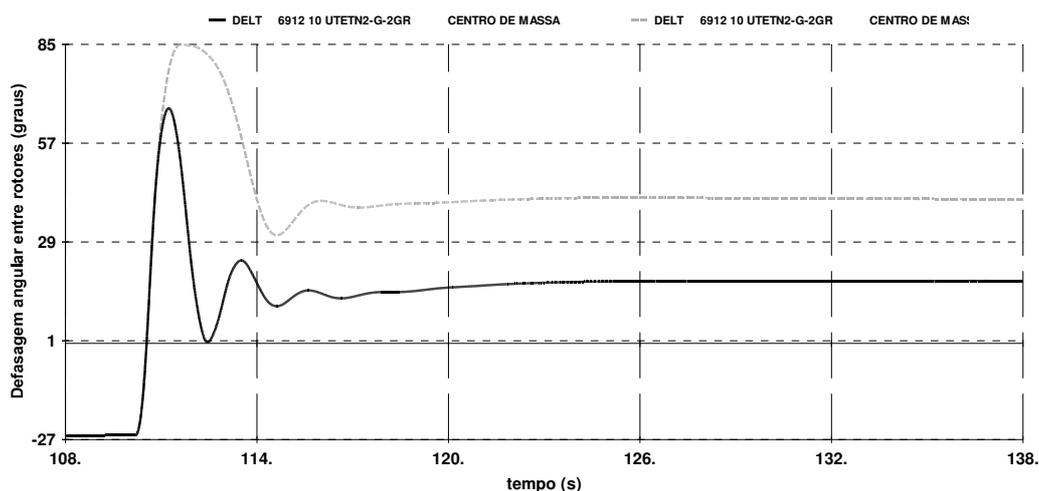


Figura 6-28: Contingência 3: Defasagem angular entre os rotores das unidades geradoras das UTE Termonorte e centro de massa (em graus) – comparação Com e Sem Redução da Ordem de Potência no VFT.

#### 6.1.5 CONTINGÊNCIA 4: CURTO-CIRCUITO NA SE SAMUEL, ELIMINADO EM 150 MS COM A ABERTURA DA LT 230 kV SAMUEL/ARIQUEMES

Esta seção apresenta resultados da simulação de um curto-circuito na SE Samuel (tensão de sequência positiva de 60%), eliminado em 150 ms através da abertura da LT 230 kV Samuel/Ariquemes. Antes da contingência, o fluxo de potência ativa neste circuito era de 46 MW. Ressalta-se que esta contingência conduz à separação do Sistema Acre/Rondônia do restante do SIN, com elevação transitória da frequência desse sistema. Para esta contingência, a tensão nas subestações de Porto Velho e Coletora Porto Velho estão apresentadas na Figura 6-29.

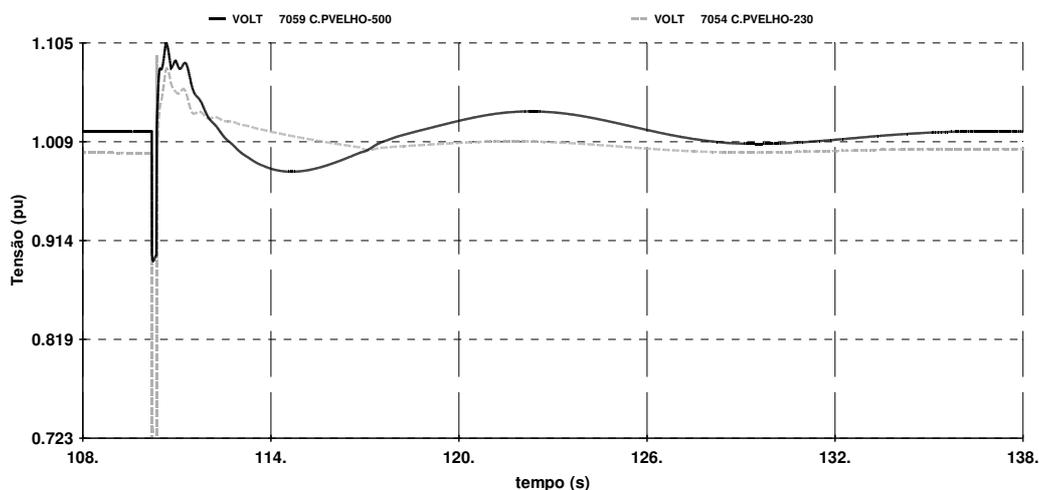


Figura 6-29: Contingência 4: Tensão na SE Coletora Porto Velho 500 kV e na SE Porto Velho 230 kV (em pu).

A Figura 6-30 apresenta a frequência elétrica nas unidades geradoras das usinas de Santo Antônio e Samuel, considerando a perda da LT 230 kV Samuel/Ariquemes. Observa-se que contingência provoca sobrefrequência no sistema Acre e Rondônia, com frequência máxima de 60,9 Hz.

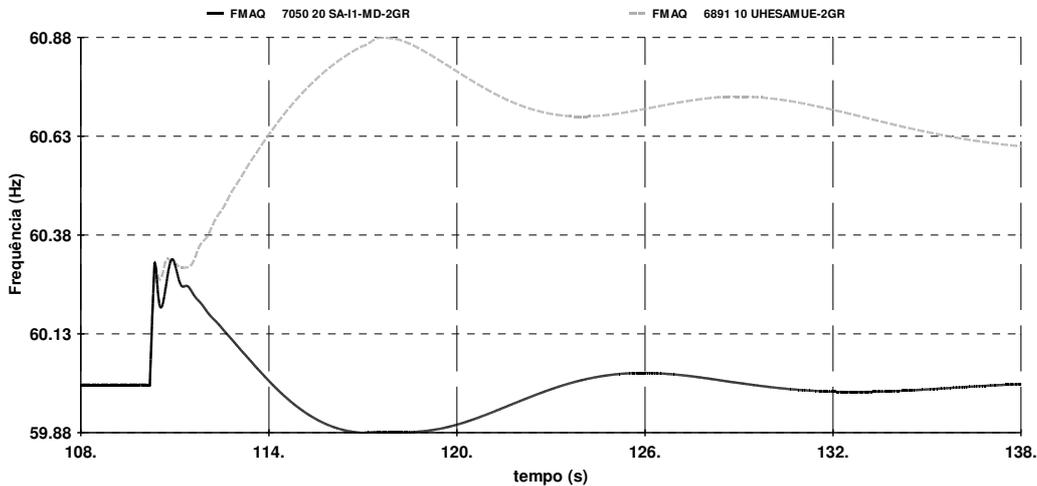


Figura 6-30: Contingência 4: Frequência nas unidades geradoras da UHE Santo Antônio e UHE Samuel (em Hz).

A Figura 6-31 apresenta a potência ativa que flui pelo VFT na interligação, bem como o valor de referência utilizado pelo sistema de controle (240 MW). Observa-se que o VFT segue adequadamente a referência de potência na interligação, restabelecendo o fluxo na interligação após o transitório provocado pela contingência.

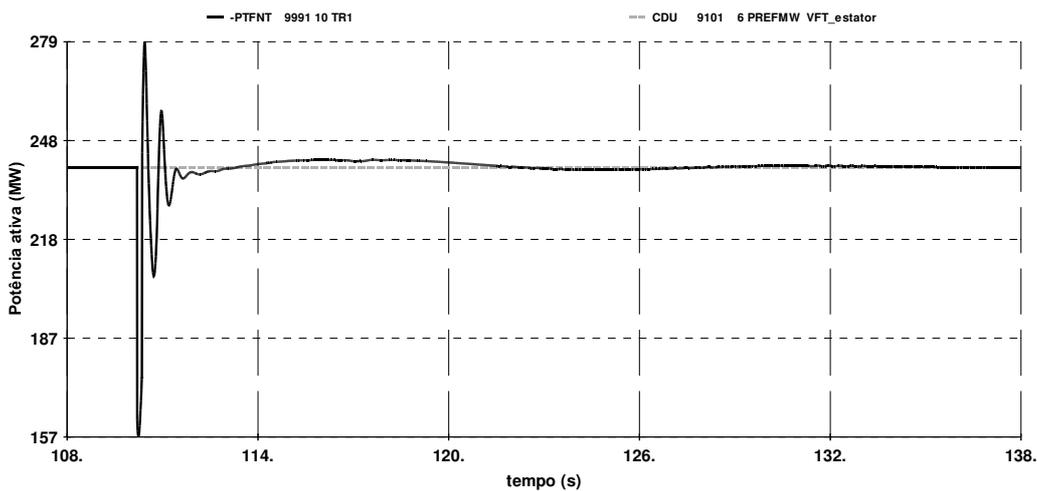


Figura 6-31: Contingência 4: Potência ativa de referência e no VFT (em MW).

A Figura 6-32 e a Figura 6-33 apresentam a potência ativa e reativa nos enrolamentos do estator e rotor do VFT, respectivamente. A velocidade do rotor do VFT está apresentada na Figura 6-34.

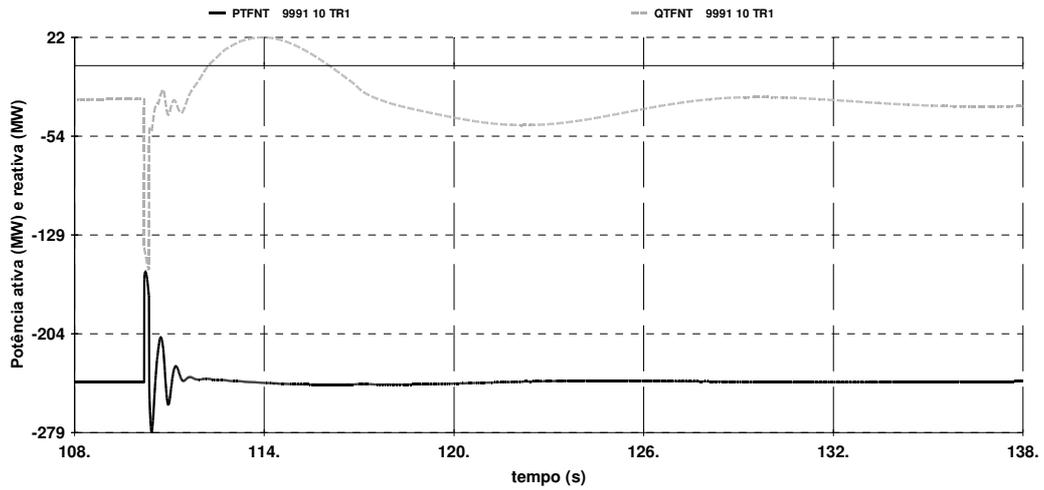


Figura 6-32: Contingência 4: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no estator do VFT.

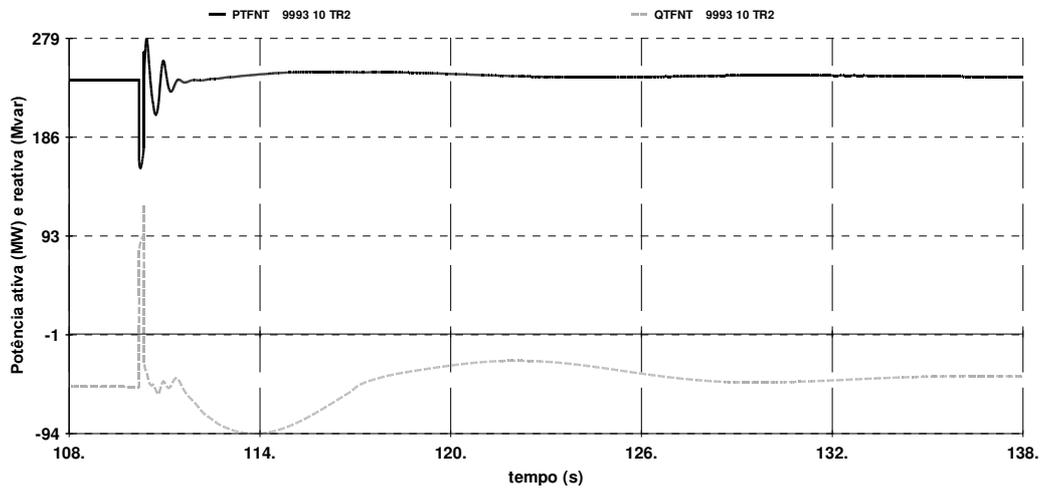


Figura 6-33: Contingência 4: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no rotor do VFT.

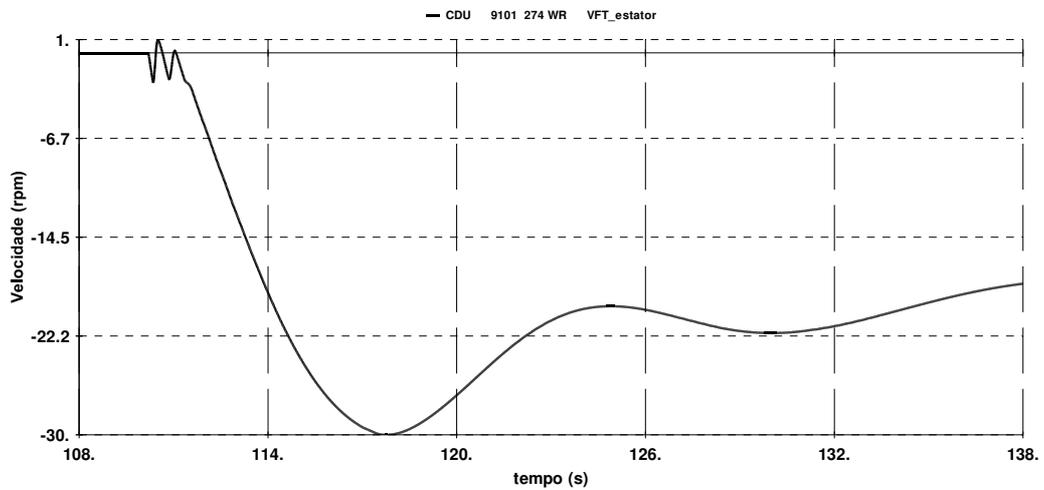


Figura 6-34: Contingência 4: Velocidade do rotor do VFT (em rpm).

Como conclusão, o VFT apresenta comportamento adequado e o sistema mostra-se dinamicamente estável. Após a contingência, verifica-se excedente de geração no sistema Acre/Rondônia, levando a frequência a valores máximos de 60,88 Hz. Nas máquinas da UHE Santo Antônio esta sobrefrequência não é observada, pois o VFT mantém o fluxo na interligação em 240 MW, a menos do transitório provocado pelo curto-circuito na rede.

## 6.2 CONEXÃO DAS UHE SANTO ANTÔNIO E JIRAU À REGIÃO SUDESTE E AO SISTEMA ACRE/RONDÔNIA

A Figura 6-35 apresenta a configuração analisada nesta seção (Configuração 2). Observa-se que as unidades geradoras das UHE Santo Antônio e Jirau conectam-se à subestação 230 kV Porto Velho, por meio de uma estação VFT (5 x 100 MW). Nesta configuração, a maior parte da energia gerada nas usinas é escoada por meio de dois bipolos de corrente contínua (2x 3.150 MW), chegando na SE Araraquara 2.

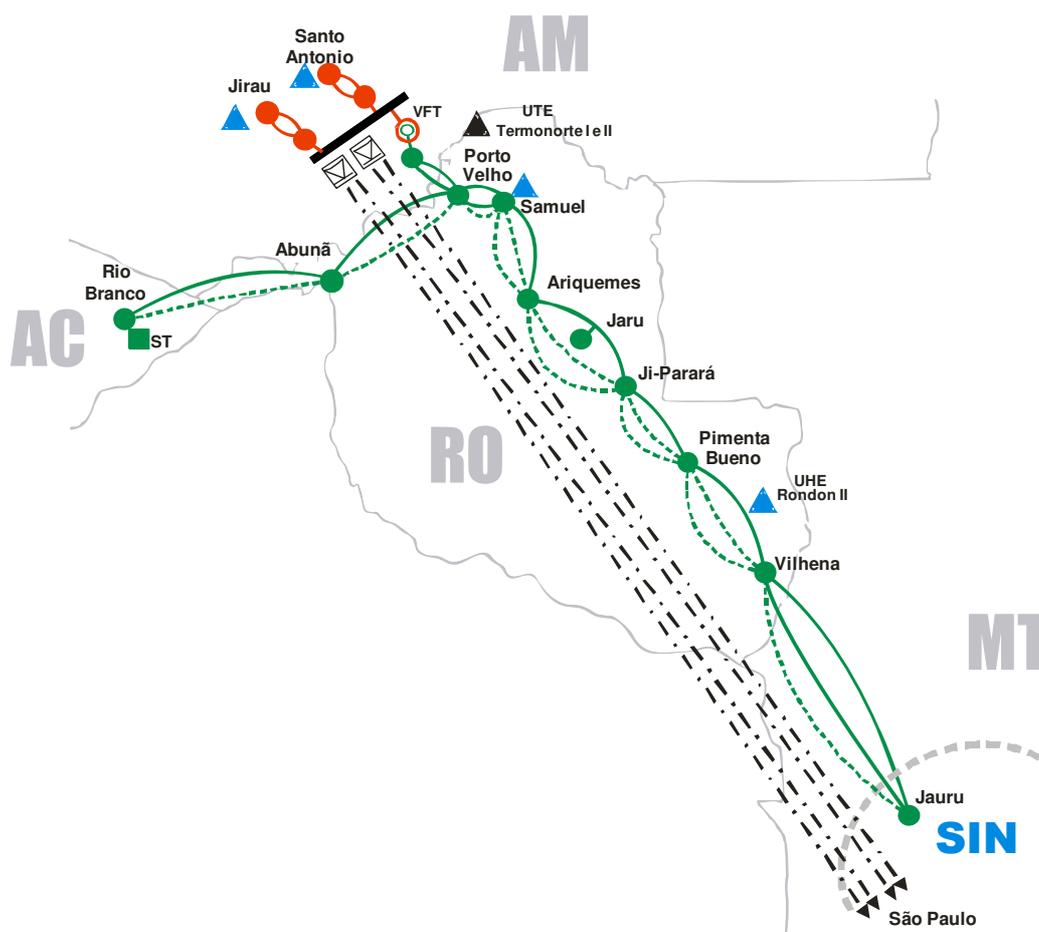


Figura 6-35: Configuração 2: UHE Santo Antônio e Jirau conectadas à região Sudeste por dois bipolos de corrente contínua e ao Sistema Acre/Rondônia por estação VFT.

A Figura 6-36 apresenta o perfil de tensão e os fluxos de potência ativa e reativa na rede de 230 kV do sistema Acre e Rondônia e UHE Santo Antônio e Jirau. A transferência para o Sudeste pelos bipolos é de 2800 MW (1400 MW na figura); pela estação VFT, a transferência é – inicialmente – nula.

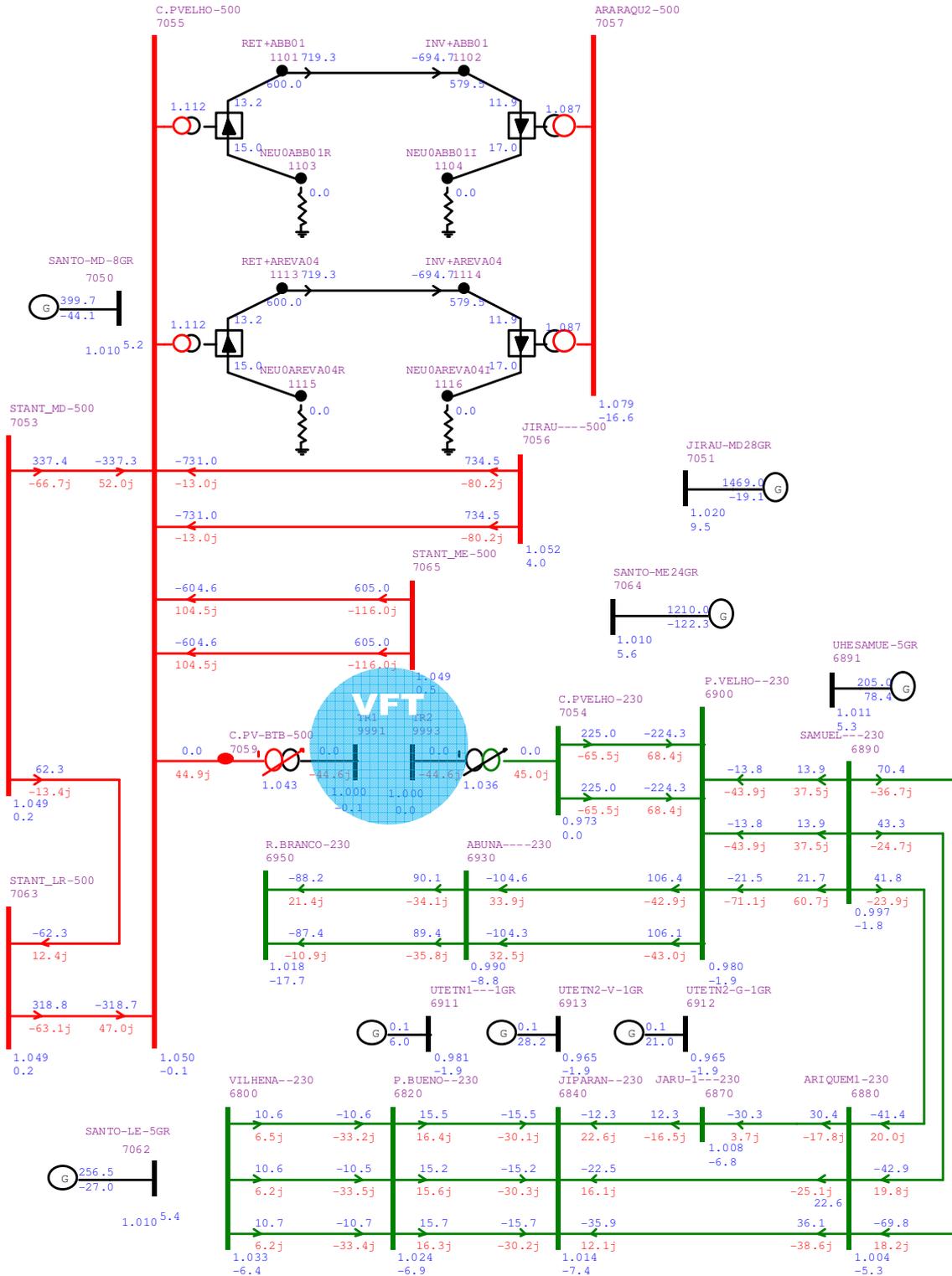


Figura 6-36: Configuração 2: Perfil de tensão, fluxos de potência ativa e reativa.

As próximas seções apresentam o processo de inicialização da simulação dinâmica, bem como resultados para contingências na rede.

### 6.2.1 INICIALIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO DINÂMICA

Para esta configuração, foi considerado processo de inicialização da simulação dinâmica similar àquele adotado para a Configuração 1. Este processo envolveu as seguintes etapas principais:

- i. Ajuste do caso base de fluxo de potência, com valores de injeção de potência reativa nas barras de fronteira compatíveis com as características do VFT (corrente de magnetização);
- ii. Ajuste do caso base de fluxo de potência com fluxo de potência ativa nulo pelo VFT;
- iii. Conexão de barras auxiliares nas barras de fronteira com o VFT de forma a facilitar o processo de inicialização. Estas barras auxiliares permitiram estabelecer referências precisas de ângulo e tensão nas barras de fronteira do VFT, na simulação de fluxo de potência, viabilizando o processo de inicialização das variáveis de estado do modelo na simulação dinâmica;
- iv. Na simulação dinâmica, desconexão das barras auxiliares e aplicação de degrau na referência do VFT. No caso da simulação apresentada nesta seção, considerou-se um degrau de 0 para 450 MW;
- v. Gravação de arquivo *snapshot* do ANATEM após 108 s de simulação, tempo suficiente para conduzir o sistema ao regime permanente;
- vi. Posteriormente, as simulações das contingências foram precedidas da leitura do arquivo *snapshot*.

A inicialização do sistema e do VFT está ilustrada na Figura 6-37, que apresenta a potência ativa e reativa no rotor do VFT, após degrau em sua referência (de 0 para 450 MW).

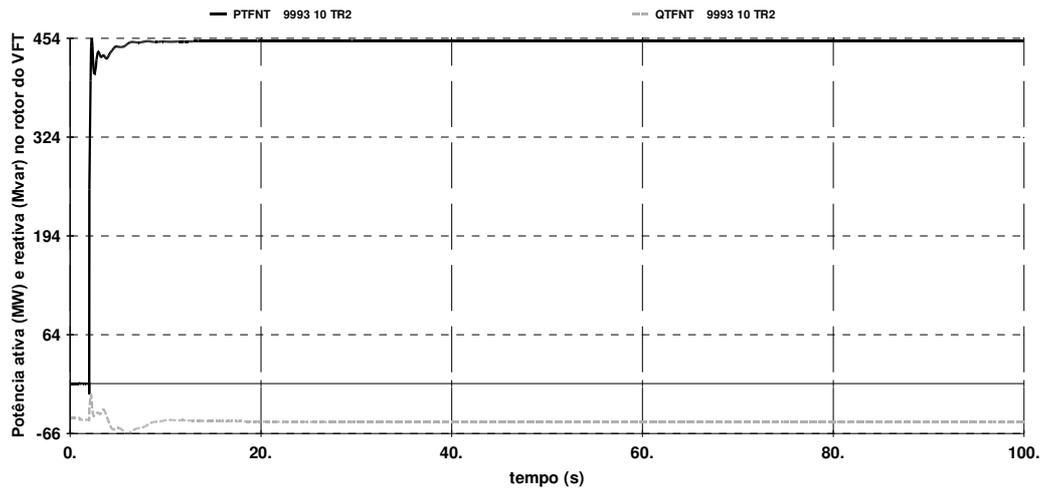


Figura 6-37: Inicialização do sistema e do VFT: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no rotor do VFT.

### 6.2.2 CONTINGÊNCIA 5: CURTO-CIRCUITO NA SE PORTO VELHO, ELIMINADO PELA ABERTURA DA LT 230 kV PORTO VELHO/ABUNÃ C1

Esta seção apresenta resultados da simulação de um curto-circuito na SE Porto Velho (tensão de sequência positiva de 77%), eliminado em 150 ms através da abertura da LT 230 kV Porto Velho/Abunã C1. Para esta contingência, a Figura 6-38 apresenta a tensão de sequência positivas nas subestações de Porto Velho e Coletora Porto Velho 230 kV.

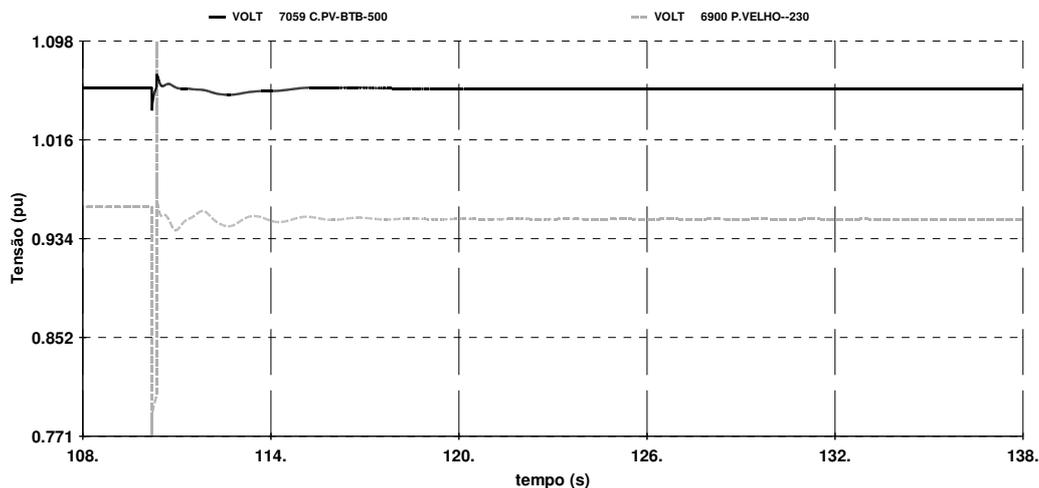


Figura 6-38: Contingência 5: Tensão na SE Coletora Porto Velho 500 kV e na SE Porto Velho 230 kV (em pu).

A Figura 6-39 apresenta a frequência elétrica nas unidades geradoras das usinas de Santo Antônio e Samuel, considerando a perda do circuito 1 da LT 230 kV Porto Velho/Abunã.

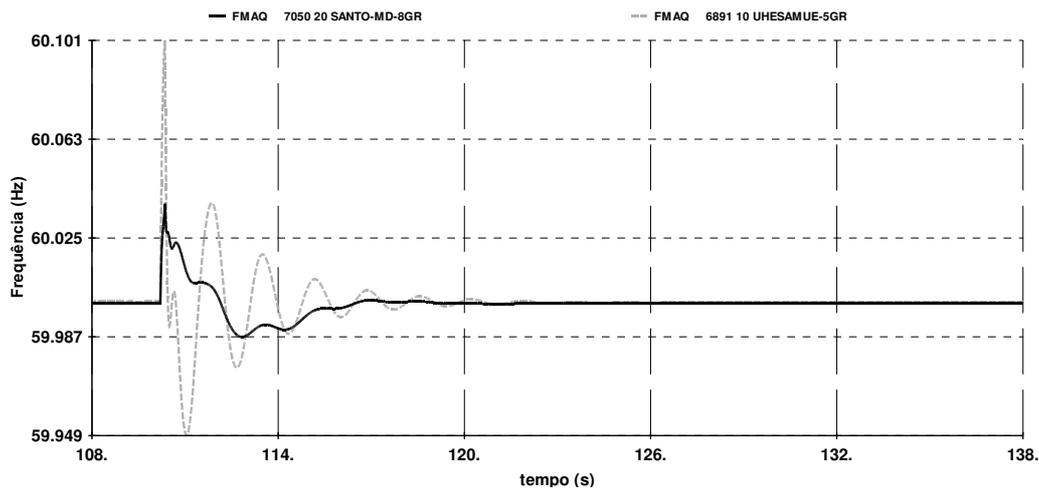


Figura 6-39: Contingência 5: Frequência nas unidades geradoras da UHE Santo Antônio e UHE Samuel (em Hz).

A Figura 6-40 apresenta a potência ativa que flui pelo VFT na interligação, bem como o valor de referência utilizado pelo sistema de controle (450 MW, neste caso). Observa-se que o VFT segue adequadamente a referência de potência na interligação, restabelecendo o fluxo na interligação após o transitório provocado pela contingência no sistema.

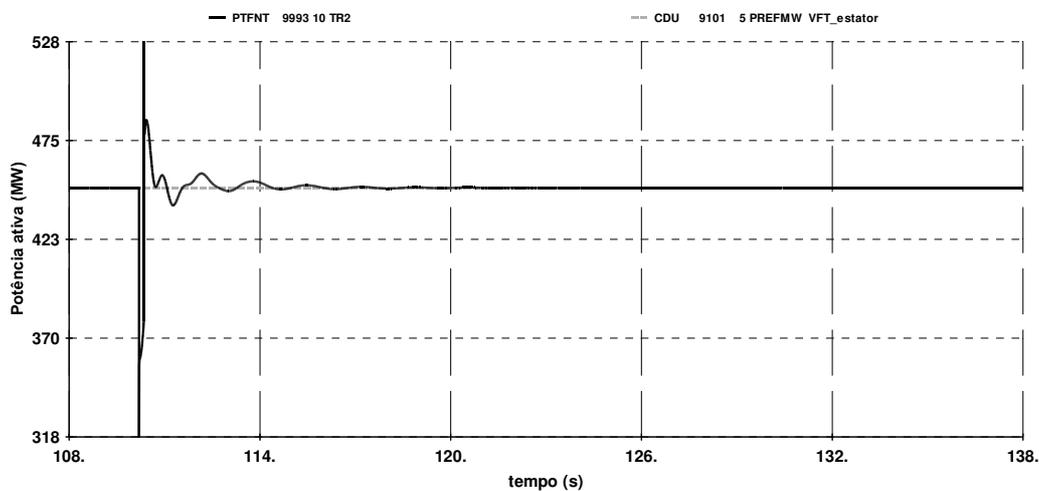


Figura 6-40: Contingência 5: Potência ativa de referência e Potência no VFT (em MW).

A Figura 6-41 apresenta a potência ativa e reativa nos enrolamentos do estator. Na Figura 6-42 está apresentada a potência ativa nos enrolamento do rotor do VFT. Observa-se que a potência ativa no estator é negativa, indicando que a potência vai do sistema para o estator do VFT. No rotor a potência ativa é positiva, pois vai do VFT para o sistema. A Figura 6-43 apresenta a velocidade do rotor do VFT.

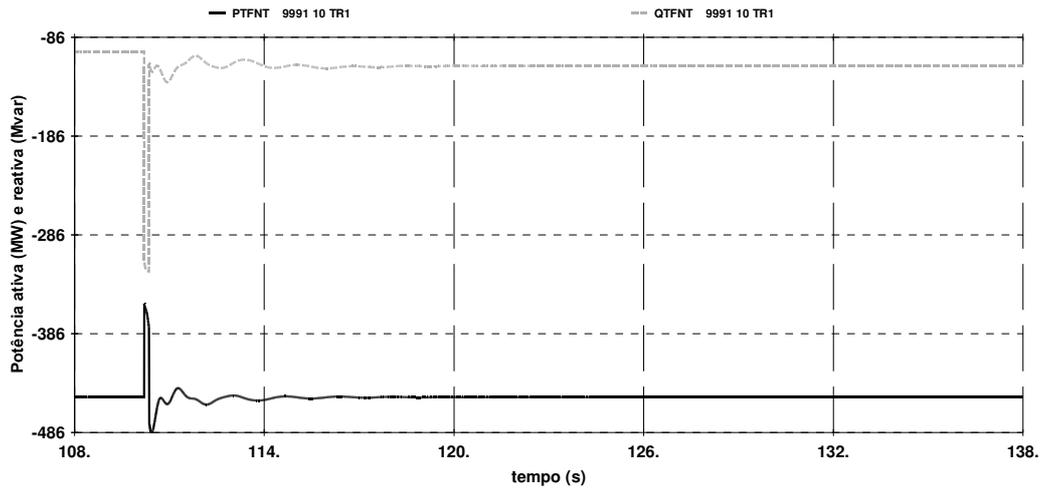


Figura 6-41: Contingência 5: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no estator do VFT.

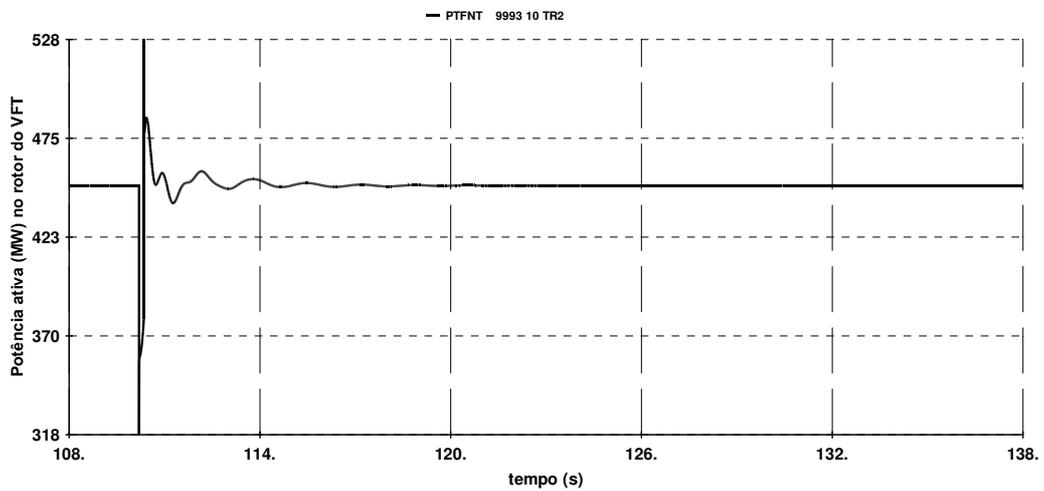


Figura 6-42: Contingência 5: Potência ativa (em MW) no rotor do VFT.

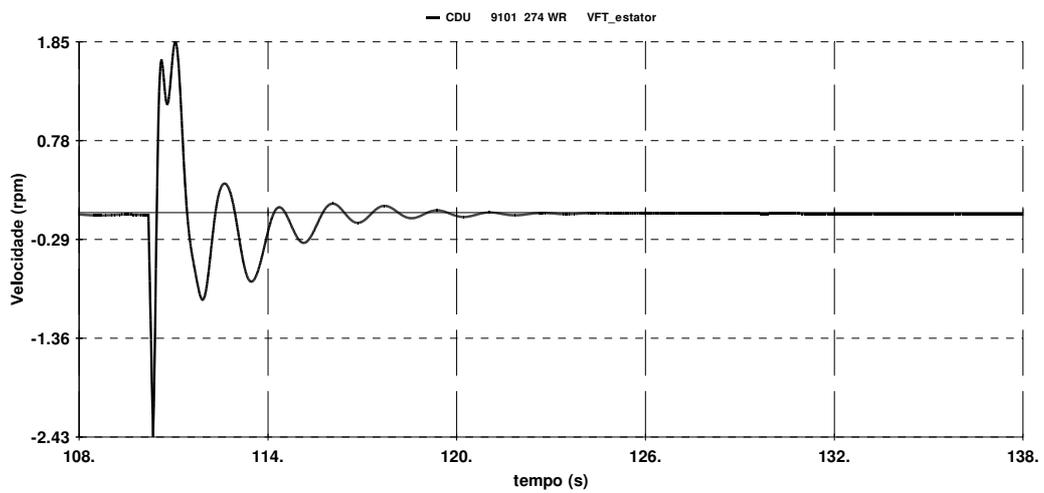


Figura 6-43: Contingência 5: Velocidade do rotor do VFT (em rpm).

A Figura 6-44 apresenta a potência elétrica nos dois polos do sistema de corrente contínua.

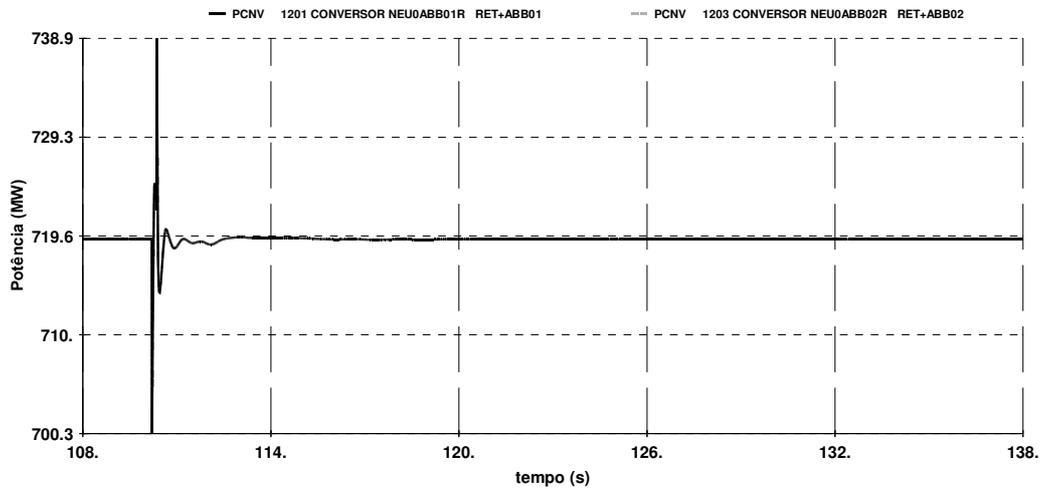


Figura 6-44: Contingência 5: Potência no sistema de transmissão em CC Coletora Porto Velho / Araraquara 2 (MW, por polo).

### 6.2.3 CONTINGÊNCIA 6: BLOQUEIO DE UM POLO DO SISTEMA HVDC COLETORA PORTO VELHO / ARARAQUARA 2

Esta seção apresenta resultados da simulação do bloqueio de um dos polos do sistema HVDC Coletora Porto Velho / Araraquara 2, com 720 MW. A Figura 6-45 apresenta as tensões nas subestações Porto Velho e Coletora Porto Velho 230 kV. Observa-se que a tensão na subestação Coletora Porto Velho atinge 115% após o bloqueio do polo do sistema de corrente contínua.

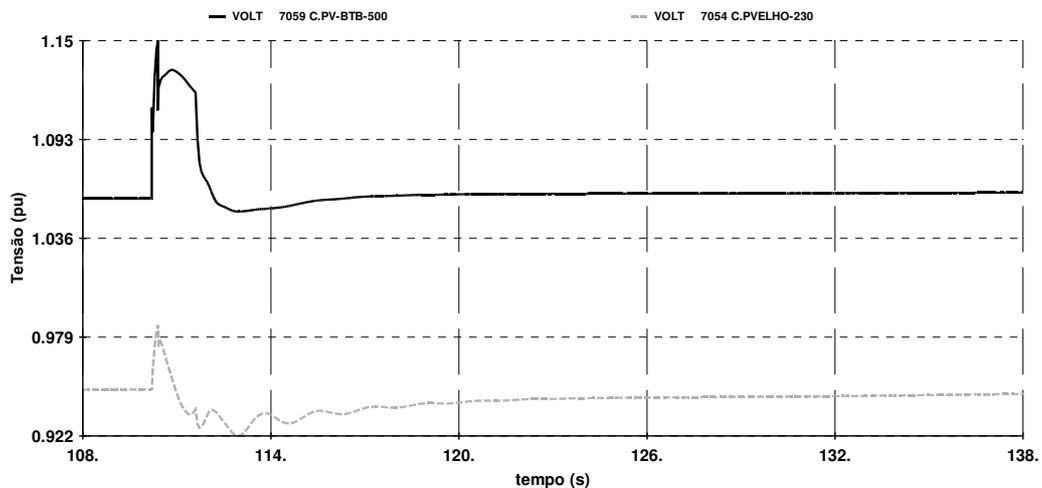


Figura 6-45: Contingência 6: Tensão na SE Coletora Porto Velho 500 kV e na SE Porto Velho 230 kV (em pu).

A Figura 6-46 apresenta a frequência elétrica nas unidades geradoras das usinas de Santo Antônio e Samuel. Observa-se sobrefrequência nas máquinas da usina de Santo Antônio, com frequência máxima de 62,7 Hz, em decorrência do bloqueio de um dos polos do sistema de corrente contínua.

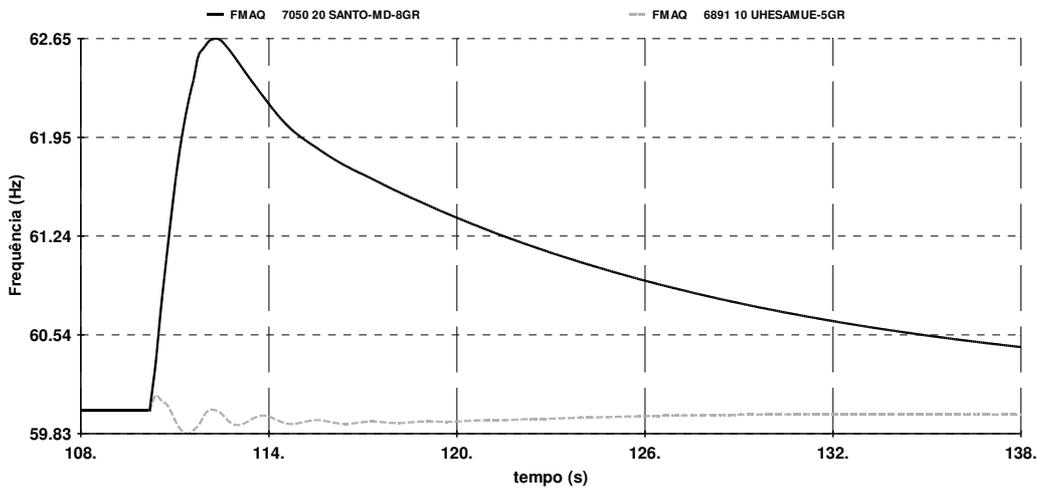


Figura 6-46: Contingência 6: Frequência nas unidades geradoras da UHE Santo Antônio e UHE Samuel (em Hz).

A Figura 6-47 apresenta a potência ativa na interligação (no VFT) e a potência de referência. Observa-se que o VFT restabelece o fluxo na interligação após transitório provocado pela contingência no sistema de corrente contínua.

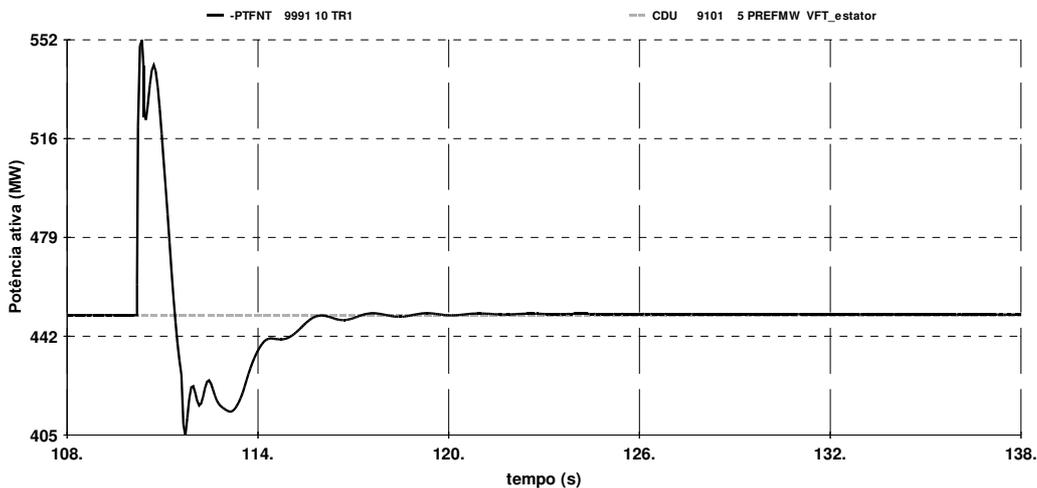


Figura 6-47: Contingência 6: Potência ativa de referência e Potência no VFT (em MW).

A Figura 6-48 e a Figura 6-49 apresentam a potência ativa e reativa nos enrolamentos do estator e rotor do VFT, respectivamente. Observa-se que a potência ativa no estator é negativa, indicando que a potência vai do sistema para o estator do

VFT. Naturalmente, no rotor a potência ativa é positiva, pois vai do VFT para o sistema. Observa-se, ainda, que a potência reativa é negativa em ambos os terminais, o que indica que o VFT absorve potência reativa da rede elétrica, como esperado.

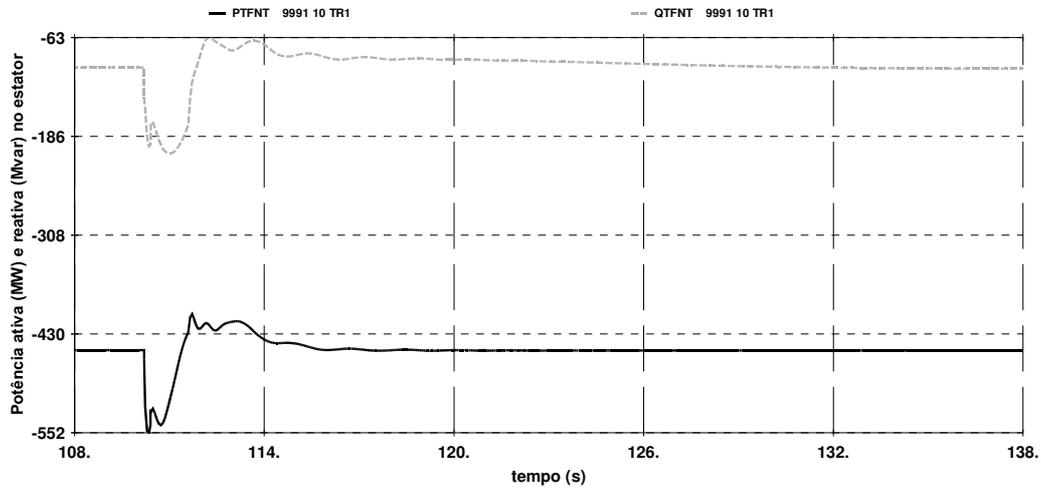


Figura 6-48: Contingência 6: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no estator do VFT.

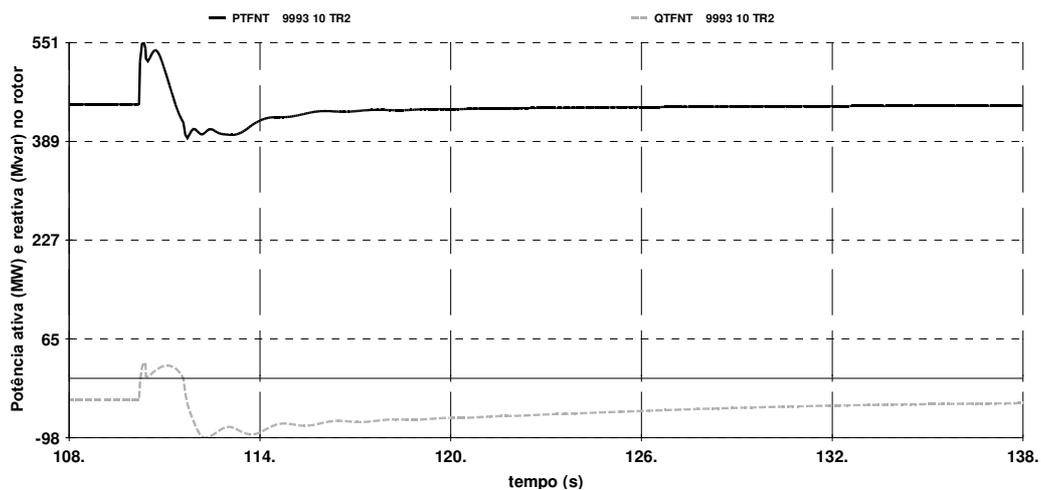


Figura 6-49: Contingência 6: Potência ativa (em MW) e reativa (em Mvar) no rotor do VFT.

A Figura 6-50 apresenta a velocidade do rotor do VFT, que atinge velocidade máxima de 80 rpm. A potência ativa nos polos do sistema de corrente contínua está apresentada na Figura 6-51.

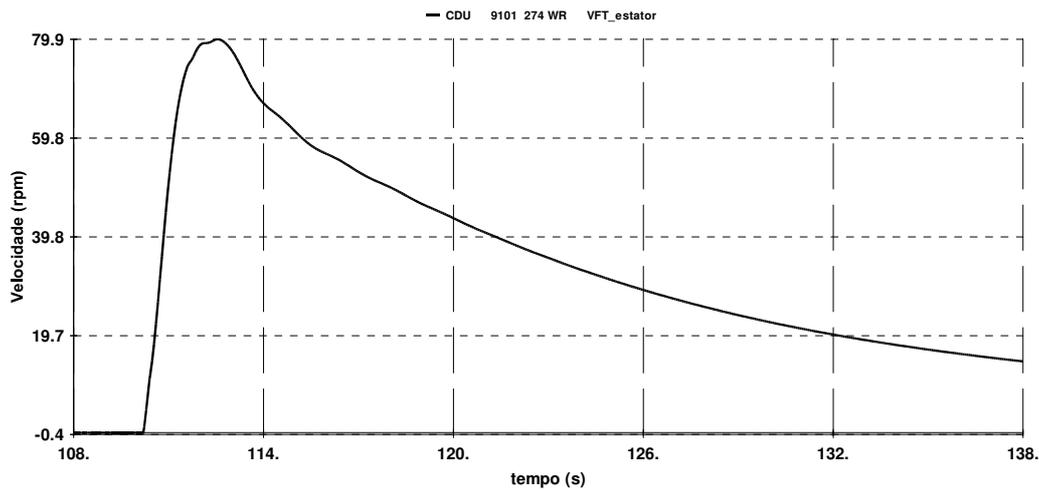


Figura 6-50: Contingência 6: Velocidade do rotor do VFT (em rpm).

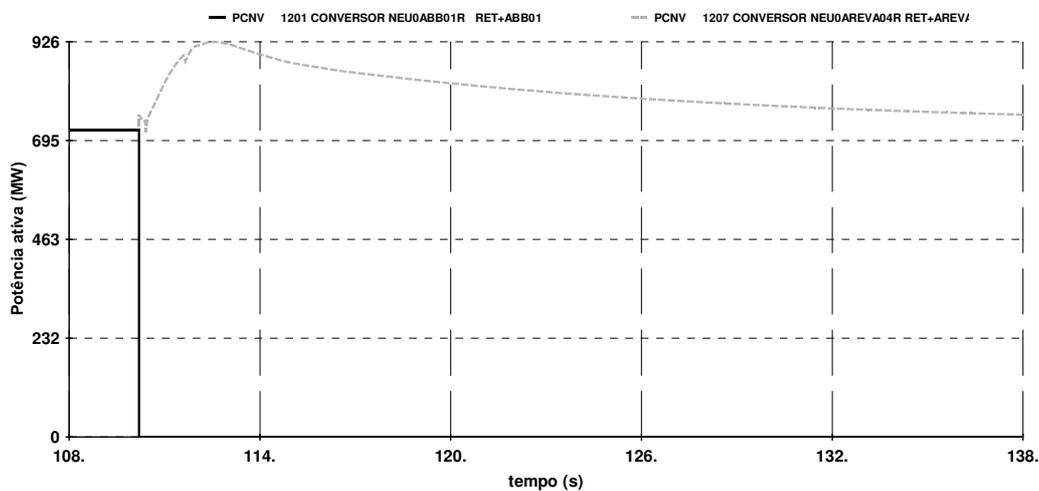


Figura 6-51: Contingência 6: Potência no sistema de transmissão em CC Coletora Porto Velho / Araraquara 2 (MW, por polo).

Como conclusão, não obstante a severidade desta contingência no sistema de corrente contínua, o VFT apresenta comportamento estável, restabelecendo a transferência de potência para o Sistema Acre/Rondônia após a estabilização do sistema.

### 6.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou resultados de simulações de transitórios eletromecânicos, considerando a configuração atual do Sistema Interligado Nacional – SIN e uma configuração futura deste sistema. Foram analisadas diversas contingências no sistema de corrente contínua de escoamento da energia gerada nas usinas de Santo Antônio e Jirau, bem como no Sistema Acre/Rondônia.

Os resultados apresentados demonstram que o desempenho dinâmico do sistema elétrico e do VFT é adequado, em regime normal e durante as contingências analisadas. Ficou demonstrado que o VFT pode ser utilizado para ações de controle sistêmico, como é o caso da redução de sua ordem de potência para aumento das margens de estabilidade dinâmica do sistema elétrico (*power runback*), quando da ocorrência de contingências. Estas conclusões mostram-se válidas para a configuração atual do SIN, bem como para a configuração final das usinas do rio Madeira.

## **7 CONCLUSÕES**

### **7.1 CONSTATAÇÕES FINAIS**

Os resultados apresentados nesta tese demonstram que a interligação de sistemas elétricos com o Transformador de Frequência Variável (VFT) é uma solução tecnicamente viável. De fato, o VFT apresenta funcionalidades similares às encontradas em sistemas HVDC, podendo ser aplicado na conexão de sistemas elétricos síncronos ou assíncronos de mesma frequência nominal.

Quando se considera a possibilidade de aplicação do VFT no Sistema Interligado Nacional (SIN), devem ser ressaltadas algumas vantagens do equipamento em relação aos sistemas HVDC baseados em conversores a tiristores, sobretudo quando estão envolvidos sistemas mais fracos. Entre essas vantagens podem ser citadas (i) a possibilidade de suprir sistemas sem fonte, permitindo sua utilização no processo de recomposição do sistema, (ii) o reduzido conteúdo harmônico das correntes injetadas na rede, pois tem origem apenas no conversor do motor CC, e (iii) a elevação dos níveis de curto-circuito em ambos os sistemas interligados, aspectos de grande relevância para o SIN. Há que se considerar, todavia, que há limitação da potência de cada unidade do VFT, que é uma máquina rotativa, atualmente na faixa de 100-150 MW. Ou seja, o aumento da potência da estação VFT depende da conexão de elementos em paralelo.

O VFT poderá ser utilizado em interligações no SIN para as quais a operação síncrona não é tecnicamente recomendável, em função dos reforços de transmissão que seriam necessários nos sistemas receptores. Há, ainda, potencial para utilização do VFT na interligação do Brasil com países vizinhos que operam com frequência nominal 60 Hz.

### **7.2 CONTRIBUIÇÕES DA TESE**

De forma a viabilizar a análise de potenciais aplicações do Transformador de Frequência Variável (VFT) no Sistema Interligado Nacional (SIN), a tese apresentou como contribuição um novo modelo digital do VFT destinado à simulação de transitórios eletromecânicos com o programa ANATEM. O modelo foi implementado através de fontes de corrente controladas e está baseado nas equações da Máquina de Indução de Dupla Alimentação (MIDA) e nas equações que descrevem a dinâmica do

rotor do VFT. O modelo permite analisar condições operativas severas para os sistemas elétricos interligados pelo VFT, nas quais se verificam grandes excursões de tensão e/ou frequência. Registre-se que o ANATEM é, atualmente, a ferramenta oficial para simulação de transitórios eletromecânicos no SIN e é utilizado pelas empresas do setor elétrico brasileiro nos estudos de planejamento da expansão e programação da operação.

Como contribuição para o caso do Sistema Interligado Nacional (SIN), a tese apresentou resultados de simulações de transitórios eletromecânicos, nos quais o VFT foi utilizado para conexão das usinas do rio Madeira ao Sistema Acre/Rondônia. Os resultados demonstram que o desempenho dinâmico do sistema elétrico e do VFT é adequado, em regime normal e durante contingências na rede. Foi demonstrado que o VFT pode ser utilizado para ações de controle sistêmico, como é o caso da redução de sua ordem de potência para aumento das margens de estabilidade dinâmica do sistema elétrico (*power runback*), quando da ocorrência de contingências. Como benefícios adicionais, a conexão com o VFT conduz à elevação dos níveis de curto-circuito na região de Porto Velho e proporciona recurso de autorrestabelecimento (*black-start*) para recomposição do Sistema Acre/Rondônia após grandes perturbações. Estas conclusões mostram-se válidas para a configuração atual do SIN, bem como para a configuração final das usinas do rio Madeira.

No que se refere ao funcionamento do VFT, as relações entre as grandezas elétricas e mecânicas no equipamento foram demonstradas na tese através do modelo matemático desenvolvido, utilizando uma nova abordagem que facilita o entendimento dos aspectos fundamentais do funcionamento do equipamento.

Fica evidente na tese que o VFT apresenta – naturalmente – torques em fase com os desvios angulares (torques de sincronismo), mesmo sem ação de controle. Esta característica, similar àquela observada em outras máquinas elétricas, está associada à tendência de alinhamento dos campos produzidos pelos enrolamentos do rotor e estator. Por outro lado, ficou demonstrado que o amortecimento das oscilações do rotor do VFT é quase nulo sem ação de um sistema de controle adequado. A utilização de sinais adicionais estabilizadores, baseados nos desvios da velocidade do VFT, agrega amortecimento suficiente às oscilações do rotor do VFT, conforme demonstrado na tese. Como contribuição, foram propostos a estrutura e os ajustes de um controlador típico para o equipamento.

### 7.3 TRABALHOS FUTUROS

i) Implementação de modelos *built-in* do VFT nos programas ANAREDE e ANATEM: a implementação dos modelos nos códigos dos programas facilitaria bastante a inicialização das simulações de transitórios eletromecânicos, acelerando as análises e a obtenção dos resultados.

ii) Implementação de modelo *built-in* do VFT no programa PACDYN: permitiria otimizar o controlador do VFT, considerando os efeitos da dinâmica dos demais equipamentos do sistema elétrico.

iii) Estudos de viabilidade técnica econômica para potenciais aplicações do VFT no SIN, incluindo a comparação com outras alternativas tecnológicas (HVDC, por exemplo).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Compensation for power transfer systems using variable rotary transformer, 5,952,816 US Patent, Issued on September 14, 1999 & Filled on November 11, 1997.
- [2] MOLINAS, M., NAKAMURA, H., KOYANAGI, A., *et al.*, “Analytical and Experimental Study of a Rotatory Phase Shifter for Power System Applications”, In: *IEEEJ Proceedings of Meeting on Power System Technology*, pp. 87-92, 1999.
- [3] MOLINAS, M., NAKAMURA, H., KOYANAGI, A., *et al.*, “Analytical and Experimental Study of a Rotatory Phase Shifter for Power System Applications”, *Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, IEE of Japan*, vol. 120 -B, n.10, pp. 1336-1342, Oct. 2000.
- [4] LARSEN, E., PIWKO, R., MCLAREN, D., *et al.*, “Variable Frequency Transformer – A New Alternative For Asynchronous Power Transfer”, Canada Power, Toronto, Canada, September 28-30, 2004.
- [5] LARSEN, E., PIWKO, R., MCLAREN, D., *et al.*, “Variable Frequency Transformer – A New Alternative For Asynchronous Power Transfer”, CEPSI, Shanghai, China, November 2004.
- [6] DOYON, P., MCLAREN, D., WHITE, M., *et al.*, “Development of a 100 MW Variable Frequency Transformer”, Canada Power, Toronto, Canada, September 28-30, 2004.
- [7] DUSSEAULT, M., GAGNON, J-M., GALIBOIS, D., *et al.*, “First VFT Application and Commissioning”, Canada Power, Toronto, Canada, September 28-30, 2004.
- [8] PIWKO, R. J., LARSEN, E. V., WEGNER, C. A., “Variable frequency transformer – a new alternative for asynchronous power transfer,” In: *IEEE Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa*, pp.393-398, July 11-15, 2005.
- [9] LARSEN, E., PIWKO, R., MCLAREN, D., *et al.*, “Variable frequency transformer - a new alternative for asynchronous power transfer”, In: *Proceedings of the IPST International Conference on Power Systems Transients*, Montreal, Canada, June 19-23, 2005.
- [10] MERKHOUF, A.; UPHADAYAY, S.; DOYON, P., *et al.*, “Variable Frequency Transformer Electromagnetic Design Concept,” In: *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Tampa, FL, pp.1-6, 24-28 June 2007.
- [11] MERKHOUF, A., DOYON, P., UPADHYAY, S., *et al.*, “Variable frequency transformer – concept and electromagnetic design evaluation,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 4, pp. 989-995, Dec. 2008.

- [12] TRUMAN, P., STRANGES, N., "A Direct Current Torque Motor for Application on a Variable Frequency Transformer", In: *Power Engineering Society General Meeting*, IEEE, 24-28 June 2007.
- [13] MARKEN, P., ROEDEL, J., NADEAU, D., *et al.*, "VFT maintenance and operating performance", In: *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, IEEE, 20-24 July 2008 Page(s):1 – 5.
- [14] HASSINK, P., MARKEN, P. E., O'KEEFE, R., *et al.*, "Improving power system dynamic performance in Laredo, TX," In: *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&D.*, pp.1-5, 21-24 April 2008.
- [15] PRATICO, E. R., WEGNER, C., LARSEN, E. V., *et al.*, "VFT Operational Overview - The Laredo Project," In: *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE* , vol., no., pp.1-6, 24-28 June 2007.
- [16] ELAHI, H., VENKATARAMAN, S., LARSEN, E., *et al.*, "The Linden Variable Frequency Transformer Merchant Transmission Project," In: *CIGRE Session*, C1-107, Paris, France, 2008.
- [17] PRATICO, E. R., WEGNER, C., MARKEN, P. E., *et al.*, "First multi-channel VFT application - the Linden project," In: *2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pp.1-7, 19-22 April 2010.
- [18] BAGEN, B., JACOBSON, D., LANE, G., *et al.*, "Evaluation of the Performance of Back-to-Back HVDC Converter and Variable Frequency Transformer for Power Flow Control in a Weak Interconnection", In: *Power Engineering Society General Meeting*, 2007. IEEE, 24-28 June 2007.
- [19] RASLAN, E. T., ABDEL-KHALIK, A. S., ABDULLA, M. A., *et al.*, "Performance of VFT when connecting two power grids operating under different frequencies," In: *5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010)*, pp.1-6, 19-21 April 2010.
- [20] WANG, L., CHEN, L., "Reduction of Power Fluctuations of a Large-Scale Grid-Connected Offshore Wind Farm Using a Variable Frequency Transformer," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol.2, no.3, pp.226-234, July 2011.
- [21] GEETHA, T., JAYASHANKAR, V., "Stability Assessment of Power System Models For Higher Wind Penetration," *Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008*, pp.1-5, 12-15 Oct. 2008.
- [22] GEETHA, T., JAYASHANKAR, V., "Variable Frequency Transformers for Increased Wind Penetration," *Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008*, pp.1-8, 12-15 Oct. 2008.

- [23] WANG, L., JAN, S., LI, C., *et al.*, "Analysis of an integrated offshore wind farm and seashore wave farm fed to a power grid through a variable frequency transformer," In: *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp.1-7, 24-29 July 2011.
- [24] Mc NABB, D., NADEAU, D., NANTEL, A., "Transient and Dynamic Modeling of the New Langlois VFT Asynchronous Tie and Validation with Commissioning Tests", In: *Proceedings of the IPST International Conference on Power Systems Transients*, Montreal, Canada, June 19-23, 2005.
- [25] VINHAES, A. C., *Utilização do Transformador de Frequência Variável na Interligação de Sistemas Elétricos*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
- [26] CHEN, G., ZHOU, X., "Digital Simulation of Variable Frequency Transformers for Asynchronous Interconnection in Power System," *2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific*, pp.1-6, 2005.
- [27] YUAN, R., CHEN, Y., CHEN, G., *et al.*, "Simulation model and characteristics of variable frequency transformers used for grid interconnection," In: *IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09*, pp.1-5, 26-30 July 2009.
- [28] EL DIN, A. H., ABDULLA, M. A. M., IBRAHIM, M., "A MATLAB/SIMULINK model to study the performance of the VFT for the interconnection of weak and strong AC grids," *2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, pp.1635-1640, 15-18 May 2011.
- [29] KUNDUR, P. S., *Power System Stability and Control*, First edition, New York, McGraw-Hill, 1994.
- [30] KIMBARK, E.W., *Direct Current Transmission*, Wiley-Interscience, 1975.
- [31] MOHAN, N., UNDELAND, T.M., ROBBINS, W. P., *Power Electronics: converters, applications and design*, John Wiley & Sons, New York, 2nd edition, 1995.
- [32] AXELSSON, U., HOLM, A., LILJEGREN, C., *et al.*, "Gotland HVDC Light Transmission – Worlds First Commercial Small Scale DC Transmission," CIRED Conference, Nice, France, 1999.
- [33] LARSSON, T., PETERSSON, A., EDRIS, A., *et al.*, "Eagle Pass back-to-back tie: a dual purpose application of voltage source converter technology," In: *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 2001. Vol. 3, Pages: 1686 - 1691.
- [34] KRAUSE, P., WASYNCZUK, O., SUDHOFF, S., *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, John Wiley & Sons, 2nd edition, 2002.
- [35] KRAUSE, P. C., THOMAS, C. H., "Simulation of Symmetrical Induction Machinery," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 84, no. 11, pp. 1038-1053, Nov. 1965.

- [36] AQUINO, A. F. C., VINHAES, A. C., WATANABE, E. H., AREDES, M., “Um Controlador aplicado ao Transformador de Frequência Variável”, aceito para publicação na revista *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*.
- [37] AQUINO, A. F. C., VINHAES, A. C., WATANABE, E. H., AREDES, M., “Conexão de sistemas elétricos utilizando o Transformador de Frequência Variável: Análise de aplicações no Sistema Interligado Nacional”, *SEPOPE – Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica*, Rio de Janeiro, Brasil, 20-23 Maio 2012.

# APÊNDICE

## Rotinas desenvolvidas em linguagem CDU do ANATEM

```
(=====
( Modelo do VFT por fontes de corrente
(=====
(
(
DCDU IMPR
(
(ncdu) ( nome cdu )
  9101 VFT_estator
(----- )
( Parametros do modelo
(----- )
(EFPAR (npar) (   valpar   )
DEFPAR #Tfsr  0.01
DEFPAR #KP    8.5
DEFPAR #KI    5.5
DEFPAR #KPSS 1000
DEFPAR #TW    3.0
DEFPAR #XM    5.6
DEFPAR #XLS   0.06
DEFPAR #XLR   0.06
DEFPAR #FREq  376.99111843077519
DEFPAR #Wbase 376.99111843077519
DEFPAR #mUM           -1.0
DEFPAR #doish           52.4 ( CONSTANTE 2H )
DEFPAR #amort 1.
DEFPAR #LOCMs           1 ( LOCAL DE MEDIÇÃO ESTATOR )
DEFPAR #LOCMr           2 ( LOCAL DE MEDIÇÃO ROTOR )
DEFPAR #LOCM1           3 ( LOCAL DE MEDIÇÃO SISTEMA 1 )
DEFPAR #LOCM2           4 ( LOCAL DE MEDIÇÃO SISTEMA 2 )
(
( Importação dos valores de potência
(nb)i(tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
0001 IMPORT PTFNT           mPMED
0002 GANHO           mPMED   PMED   -1.0
0003 ENTRAD           UM
0004 ENTRAD           PREF
0005 GANHO           PREF   PREFmw  100.
0006 SAIDA           PREFmw
0007 IMPORT WMAQ           FMAQ1 #LOCM1
0008 IMPORT WMAQ           FMAQ2 #LOCM2
( -----
( Calculo das variaveis nos eixos D e Q do estator [verificado]
(nb)i(tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
0010 IMPORT VOLTR           VQs #LOCMs
0011 IMPORT VOLTI           mVDs #LOCMs
0012 GANHO           mVDs   VDs   -1.0
( -----
( Calculo das variaveis nos eixos D e Q do rotor
(nb)i(tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
0020 IMPORT VOLTR           X0020 #LOCMr
0021 IMPORT VOLTI           X0021 #LOCMr
0022 FUNCAO   COS dTETAr   CSdTr
0023 FUNCAO   SIN dTETAr   SNdTr
0024 MULTPL           CSdTr X0024
           X0020 X0024
0025 MULTPL           SNdTr X0025
           X0021 X0025
```

```

0026 SOMA          X0024    VQr
                   - X0025    VQr
0027 MULTPL       SNdTr    X0027
                   X0020    X0027
0028 MULTPL       CSdTr    X0028
                   X0021    X0028
0029 SOMA         X0027    mVDr
                   X0028    mVDr
0030 GANHO        mVDr     VDr    -1.0
0031 PROINT       wrPU    dTETAr #Wbase  0.0  1.0
(
( -----
( Calculo dos enlaces de fluxo [verificado]
(
( Calculo do Fimq
( a=Xmq/Xlr, b=Xmq/Xls]
( Xaq=Xad=Xmd=Xmq=1/(1/Xm + 1/Xls + 1/X'lr)
( Xm=5.6 - dado
( Xlr=X'lr=0.06 - dado (para Ns=Nr)
( Xls=0.06 - dado
( Xaq=Xad=Xmd=Xmq=0.02984014210 - calculado
( #a=Xmq/X'lr=0.49733570160
( #b=Xmq/Xls=0.49733570160
(
(EFPAR (npar) ( valpar )
DEFPAR #a      0.497335701599
DEFPAR #b      0.497335701599
(
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax) )
0051 GANHO      FiQr      X51      #a
0052 GANHO      FiQs      X52      #b
0053 SOMA       X51       FimQ
                   X52       FimQ
(
( Calculo do Fimd
( #a=Xad/X'lr=Xaq/X'lr=0.497335701599
( #b=Xad/Xls=Xaq/Xls=0.497335701599
(
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax) )
0061 GANHO      FiDr      X61      #a
0062 GANHO      FiDs      X62      #b
0063 SOMA       X61       FimD
                   X62       FimD
(
( Calculo do FiDs
( d=1.0
(EFPAR (npar) ( valpar )
DEFPAR #d      1.
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax) )
0072 GANHO      VQs       FiDs      #d
(
( Calculo do FiDr
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax) )
0082 GANHO      VQr       X82      #d
0083 SOMA       UM        SLIP
                   -wrPU    SLIP
0088 DIVSAO     X82       FiDr
                   SLIP     FiDr
(
( Calculo do FiQs
( md=-1.0
(EFPAR (npar) ( valpar )
DEFPAR #md     -1.0

```

```

(-3.141592653589793
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax) )
0093 GANHO          VDs      FiQs      #md
(
( Calculo do FiQr
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax) )
0102 GANHO          VDr      X102      #md
0108 DIVSAO          X102      FiQr
          SLIP      FiQr
(
( -----
( Calculo das correntes nos eixos D e Q [verificado]
( f=1/Xls=1/0.06=16.6666666667
( g=1/X'lr=1/0.06=16.6666666667
(
(EFPAR (npar) ( valpar )
DEFPAR #f          16.6666666667
DEFPAR #g          16.6666666667
(
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax) )
0200 SOMA          -FimQ      X200
          +FiQs      X200
0201 GANHO          X200      iQs      #f
0202 SOMA          -FimQ      X202
          +FiQr      X202
0203 GANHO          X202      iQr      #g
0204 SOMA          -FimD      X204
          +FiDs      X204
0205 GANHO          X204      iDs      #f
0206 SOMA          -FimD      X206
          +FiDr      X206
0207 GANHO          X206      iDr      #g
(
( Calculo das correntes nos eixos Re e Im
(nb)i(tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
(
( no estator
0211 GANHO          iQs      iRs      -1.0
0212 GANHO          iDs      iIs      1.0
0400 EXPORT IIRFNT  iRs
0401 EXPORT IIIFNT  iIs
(
( no rotor
0221 GANHO          dTETAr   mdTr     1.0
0222 FUNCAO        COS      mdTr   CSmdTr
0223 FUNCAO        SIN      mdTr   SNmdTr
0224 MULTPL        CSmdTr   X224
          iQr      X224
0225 MULTPL        SNmdTr   X225
          iDr      X225
0226 SOMA          X224    iQrL
          - X225    iQrL
0227 MULTPL        SNmdTr   X227
          iQr      X227
0228 MULTPL        CSmdTr   X228
          iDr      X228
0229 SOMA          X227    iDrL
          X228    iDrL
(
0241 GANHO          iQrL    iRr     -1.0
0242 GANHO          iDrL    iIr     1.0
0410 EXPORT CDU     iRr
0411 EXPORT CDU     iIr

```

```

(
(
( Calculo do torque eletromagnetico
(
0250 MULTPL      FiQr      X250
                iDr       X250
0251 MULTPL      FiDr      X251
                iQr       X251
0252 SOMA        X250      TE
                -X251     TE

(
( SISTEMA DE CONTROLE
(
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax) )
0300 SOMA        PREF      errP
                -PMED     errP
0301 PROINT      errP      X201 #KI  #KP    1.0      LMIN  LMAX
0302 SOMA        X201      TD
                -SPSS     TD
9302 LIMITA      TD        TDL          LMIN  LMAX
9303 SOMA        wrPu      X9303
                DFerr     X9303
0303 WSHOUT      X9303     X303 #TW    1.0#TW
0304 GANHO       X303      mPSS #KPSS
0305 GANHO       mPSS      SPSS -1.0
0310 SOMA        -FMAQ1    X310
                FMAQ2    X310
(nb)i(tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
0311 LEDLAG      X310     DFerr  1.0      1.0 #TFsr
(
( Calculo da velocidade do rotor
(
(nb)i(tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
0269 SOMA        TE        Tace
                -TDL     Tace
0271 LEDLAG      TACE     wrPU    1.0      #amort#doisH
0273 GANHO       dTETAr  fivFT  57.296
0274 GANHO       wrPU     wr      1800
0275 MULTPL      wrPU     pmPU
                TD       pmPU
0276 GANHO       pmPU     pm      100.
0277 SAIDA      fivFT
0278 SAIDA      wr
0279 SAIDA      pm

(
(
(+++++ )
(DEFINICAO DAS VARIAVEIS (DEFVAL ) )
(+++++ )
(
(DEFVA (stip) (vdef) ( dl )
DEFVAL      LMIN      -4.0
DEFVAL      LMAX      4.0
DEFVAL      dTETAr   0.0
( esse valor de dTETAr deve ser inicializado se houver Pativa
DEFVAL      UM        1.0
DEFVAL      wrPU     0.0

(
FIMCDU
(

```

```

(ncdu) ( nome cdu )
  9201 VFT_rotor
(
(nb)i(tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
0001 IMPORT CDU          XiRrD  9410
0002 IMPORT CDU          XiIrD  9411
0003 ENTRAD             FOLGA1
0004 ENTRAD             FOLGA2
9008 IMPORT VOLTR       Vreal
9018 SAIDA              Vreal
9009 IMPORT VOLTI       Vimag
9019 SAIDA              Vimag
(nb)i(tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
0300 SOMA              XiRrD   iRrD
                        FOLGA1   iRrD
0301 SOMA              XiIrD   iIrD
                        FOLGA2   iIrD
(0300 GANHO            XiRrD   iRrD   1.0
(0301 GANHO            XiIrD   iIrD   1.0
0400 EXPORT IIRFNT     iRrD
0401 EXPORT IIIFNT     iIrD
0500 SAIDA             FOLGA1
0501 SAIDA             FOLGA2
(
FIMCDU
(
999999
)

```