



**COPPE/UFRJ**

UTILIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL NA  
INTERLIGAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

Arjan Carvalho Vinhaes

Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Edson Hirokazu Watanabe

Rio de Janeiro  
Outubro de 2009

UTILIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL NA  
INTERLIGAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

Arjan Carvalho Vinhaes

DISSERTAÇÃO 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 MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

---

Prof. Edson Hirokazu Watanabe, D. Eng.

---

Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D.

---

Dr Prof. Pedro Gomes Barbosa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2009

Vinhaes, Arjan Carvalho

Utilização do Transformador de Frequência Variável na Interligação de Sistemas Elétricos/Arjan Carvalho Vinhaes.  
- Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009

XVII, 94 p.: il., 29,7 cm

Orientador: Edson Hirokazu Watanabe

Dissertação (Mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2009.

Referencias Bibliográficas: p. 91-94.

1. VFT (*Variable Frequency Transformer*) 2. Transformador Rotativo. 3. Interconexão de Sistema de Potência. 4. Controle do Fluxo de Potência. 5. Transformador de Frequência Variável. I. Watanabe, Edson Hirokazu II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

À minha esposa Aline,  
Aos meus pais Marcos Cesar e Eloiza,  
A minha irmã Elaine.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que me sustenta e me oferece inúmeras oportunidades de ser feliz.

À minha esposa Aline, fortaleza e companheira leal nesta difícil caminhada. O seu amor e sua compreensão fizeram deste trabalho realidade.

Ao meu pai, minha mãe e irmã, que me deram toda a estrutura e o amor que uma família pode ofertar.

Ao meu orientador Edson Watanabe por sua ajuda, direcionamento, ensinamentos e por ter acreditado em mim e me dado a oportunidade de ser seu orientado. Sem dúvida, sua proximidade, preocupação e cuidado serviram de estímulo para que eu me empenhasse cada vez mais para concluir a dissertação. Professor, aqui deixo os meus sinceros agradecimentos.

Ao amigo e engenheiro Antonio Felipe da Cunha de Aquino, que teve papel fundamental na realização deste trabalho. Sem sua contribuição, este trabalho não seria possível.

A todos àqueles que colaboraram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho e que não foram citados nominalmente.

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

## UTILIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE FREQUENCIA VARIÁVEL NA INTERLIGAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

Arjan Carvalho Vinhaes

Outubro/2009

Orientador: Edson Hirokazu Watanabe

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho tem como finalidade apresentar aspectos teóricos e de simulação computacional relativos à aplicação do transformador de frequência variável, conhecido como VFT (do inglês *Variable Frequency Transformer*), na interligação de sistemas de potência. O VFT é um equipamento que permite transferir energia entre dois sistemas de potência síncronos ou assíncronos, podendo controlar fluxo em ambos os sentidos.

O VFT é um transformador defasador rotativo com enrolamentos trifásicos - por meio dos quais é possível conectar dois sistemas de potência -, que apresenta as mesmas funcionalidades de um sistema “back-to-back” CCAT. Mecanicamente acoplado ao eixo está um servo motor (máquina aplicadora de torque e acionamento eletrônico), equipamento que permite ajustar a posição relativa do campo do rotor e do estator, agregando controle contínuo do fluxo de energia que atravessa o equipamento.

Em suma, a proposta desta dissertação é analisar em detalhes o VFT como uma alternativa capaz de conectar sistemas de potência, de forma a proporcionar controle preciso, ágil e desacoplado na interligação em que ele estiver inserido.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.)

USE OF VARIABLE FREQUENCY TRANSFORMER IN AN ELECTRICAL  
POWER SYSTEMS INTERCONNECTION

Arjan Carvalho Vinhaes

October/2009

Advisor: Edson Hirokazu Watanabe

Department: Electric Engineering

The objective of this work is to present the operating principles and some computer simulations related to the application of VFT (Variable Frequency Transformer) in the interconnection of power systems. The VFT is a device that allows two power systems (synchronous and asynchronous) transfers energy from each other, controlling the appropriate flow in both directions.

The VFT is a controllable bi-directional transmission device with two three-phase windings – from which it is possible to connect two power systems -, with features similar to the back-to-back HVDC. Mechanically coupled to the shaft is a servo motor (machine plus electric drive), an equipment that adjusts the relative position of the rotor and stator fields, adding continuous control of energy flow through the equipment.

In short, the purpose of this work is to analyze in detail the VFT as an alternative to connect two power systems, in order to provide precise, fast and decoupled control of the interconnection.

# ÍNDICE

CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Identificação do problema.....	1
1.2 Motivação.....	2
1.3 Objetivo.....	4
1.4 Estrutura do Texto .....	4
CAPÍTULO 2 .....	6
PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DO VFT .....	6
2.1 Transformador Rotativo.....	6
2.1.1 Considerações Iniciais .....	8
2.1.2 Representação Física do Transformador Rotativo .....	8
2.1.3 Circuito Equivalente em Coordenadas abc .....	9
2.1.4 Relação de Transformação.....	10
2.1.5 Modelo do Transformador Rotativo .....	10
2.1.5.1 Equações Diferenciais no Referencial Genérico .....	11
2.1.5.1.1 Equações das Tensões no Referencial Genérico .....	11
2.1.5.1.2 Equações dos Fluxos no Referencial Genérico .....	11
2.1.5.1.3 Equações do Torque Eletromagnético, da Potência Ativa e Reativa no Referencial Genérico.....	12
2.1.6 Operação em Regime Permanente.....	13
2.1.7 Alternativas de Interligação de Sistemas Elétricos Utilizando o Transformador Rotativo .....	15
2.1.8 Velocidade de Rotação do Rotor.....	17
2.1.9 Relação entre Potência e Ângulo.....	18
2.2 Servos motores .....	20
2.2.1 Acionamentos com máquinas de corrente contínua .....	21
2.2.1.1 Conversores adequados.....	21
2.2.2 Acionamentos com máquinas assíncronas .....	22
2.2.2.1 Conversores adequados.....	22
2.2.3 Acionamentos com máquinas síncronas .....	23



2.2.3.1	Conversores adequados.....	24
2.3	Estratégia de Controle do Fluxo de Potência .....	24
2.4	Comentários finais .....	28
CAPÍTULO 3 .....		29
DESEMPENHO DO VFT EM REGIME PERMANENTE .....		29
3.1	Modelo para o VFT desenvolvido no ANAREDE para regime permanente 29	
3.2	Simulações em regime permanente para fluxo variando de 0 a 100% (sem compensação reativa).....	30
3.2.1	Tensão controlada nos terminais VFT .....	31
3.2.2	Sem controle de tensão nos terminais do VFT.....	32
3.3	Efeitos da variação do nível de curto-circuito.....	34
3.4	Efeitos da conexão da compensação shunt .....	35
3.5	Comentários finais .....	37
CAPÍTULO 4 .....		38
DESEMPENHO DO VFT EM REGIME DINÂMICO.....		38
4.1	Modelo para Regime Dinâmico .....	38
4.2	Sistema de Controle.....	39
4.3	Desempenho Dinâmico do VFT considerando o Modelo Desenvolvido no ANATEM.....	40
4.3.1	Resposta Dinâmica do VFT em Conexões Síncronas .....	42
4.3.1.1	Caso 1: Mudança de referência de potência, com frequência constante e sem manobra de banco de capacitores .....	43
4.3.1.2	Caso 2: Mudança de referência de potência e curto-circuito trifásico.....	47
4.3.1.3	Caso 3: Mudança de referência de potência, com frequência constante e com manobra de banco de capacitores.....	51
4.3.2	Resposta Dinâmica do VFT em Conexão Assíncronas de Mesma Frequência Nominal.....	55
4.3.2.1	Caso 4: Mudança de Referência de potência, com frequência constante e sem manobra de banco de capacitores .....	56
4.3.2.2	Caso 5: Mudança de Referência de potência e curto-circuito trifásico .....	60

4.3.2.3	Caso 6: Mudança da Referência de potência, com frequência constante e com manobra de banco de capacitores.....	63
4.4	Comparação dos Resultados.....	67
4.5	Comentários finais .....	68
CAPÍTULO 5 .....		69
DESEMPENHO DO VFT EM REGIME DE TRANSITÓRIOS		
ELETROMAGNÉTICOS .....		69
5.1	Modelos do VFT para transitórios eletromagnéticos.....	69
5.2	Sistema de controle.....	70
5.3	Desempenho do VFT considerando o Modelo Desenvolvido no PSCAD/EMTDC.....	70
5.3.1	Simulações do VFT em Conexão Assíncronas de Mesma Frequência Nominal	72
5.3.1.1	Caso 1: Mudança de Referência de potência, com frequência constante e sem manobra de banco de capacitores .....	72
5.3.1.2	Caso 2: Mudança de Referência de potência e curto-circuito monofásico .	80
5.4	Comentários finais .....	88
CAPÍTULO 6 .....		89
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....		89
6.1	Conclusões .....	89
6.2	Trabalhos futuros.....	90
REFERÊNCIAS .....		91

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Principais componentes do VFT .....	3
Figura 2.1 - Corte esquemático do transformador rotativo .....	7
Figura 2.2 - Ligação entre sistemas através do transformador rotativo (Máquina de indução duplamente alimentada) .....	7
Figura 2.3 – Representação física do transformador rotativo .....	9
Figura 2.4 – Circuito equivalente em coordenadas abc .....	9
Figura 2.5 – Circuito elétrico equivalente do transformador rotativo em coordenadas dq orientadas no referencial genérico .....	13
Figura 2.6 – Circuito equivalente do transformador rotativo .....	15
Figura 2.7 – Circuito equivalente com parâmetros redefinidos .....	15
Figuras 2.8 – Interligação síncrona .....	16
Figuras 2.9 – Interligação assíncrona .....	17
Figura 2.10 - Diagrama fasorial do VFT .....	20
Figura 2.11 – Conversores estáticos aplicados a este panorama .....	22
Figura 2.12 – Esquema do conversor de malha intermediária de tensão (VSC) .....	23
Figura 2.13 – Esquema de conversor matricial. ....	23
Figura 2.14 – Diagrama representativo do VFT .....	25
Figura 2.15 – Diagrama de blocos do sistema de controle .....	27
Figura 3.1 – Modelo para análise de fluxo de potência .....	30
Figura 3.2 – VFT entre duas barras infinitas .....	31
Figura 3.3 – Potência em função do ângulo. ....	32
Figura 3.4 – VFT entre dois transformadores e as barras infinitas .....	32
Figura 3.5 – Gráfico das curvas de ângulo de potência .....	33
Figura 3.6 – Gráfico da curva P X V .....	33
Figura 3.7 – Gráfico das curvas de ângulo de potência .....	34
Figura 3.8 – Gráfico das curvas PX V .....	34
Figura 3.9 – Gráfico da curva P X Q .....	35
Figura 3.10 – Gráfico das curvas de ângulo de potência .....	36
Figura 3.11 – Gráfico das curvas de potência X tensão .....	36
Figura 4.1 – Modelo para simulações dinâmicas do VFT .....	38

Figura 4.2 – Diagrama unifilar do sistema desenvolvido para as simulações dinâmicas em uma interligação síncrona. ....	41
Figura 4.3 – Diagrama unifilar do sistema desenvolvido para as simulações dinâmicas em uma interligação assíncrona. ....	41
Figura 4.4 – Potência de referência e medida no VFT. ....	43
Figura 4.5 – Potência ativa na interligação e no VFT. ....	44
Figura 4.6 – Defasagem angular no VFT (graus). ....	45
Figura 4.7 – Potência mecânica entregue ao VFT pelo acionamento eletromecânico. ...	45
Figura 4.8 – Velocidade do rotor do VFT em pu. ....	46
Figura 4.9 – Torque aplicado ao eixo do VFT (pu) limitado em $\pm 4.0$ pu. ....	47
Figura 4.10 – Valor da tensão nos terminais do VFT (pu). ....	47
Figura 4.11 - Potência de referência e medida no VFT. ....	48
Figura 4.12 – Potência ativa na interligação e no VFT. ....	49
Figura 4.13 – Defasagem angular no VFT (graus). ....	49
Figura 4.14 – Potência mecânica entregue ao VFT pelo acionamento eletromecânico. ...	50
Figura 4.15 – Velocidade do rotor do VFT em pu. ....	50
Figura 4.16 – Torque aplicado ao eixo do VFT (pu). ....	51
Figura 4.17 – Tensão nos terminais do VFT (pu). ....	51
Figura 4.18 – Potência de referência e medida no VFT. ....	52
Figura 4.19 – Potência ativa na interligação e no VFT. ....	53
Figura 4.20 – Defasagem angular no VFT (graus). ....	53
Figura 4.21 - Potência mecânica entregue ao VFT pelo servo motor. ....	54
Figura 4.22 – Velocidade do rotor do VFT em pu. ....	54
Figura 4.23 – Torque aplicado ao eixo do VFT pelo servo motor. ....	55
Figura 4.24 – Tensões nos terminais do VFT. ....	55
Figura 4.25 – Potência de referência e medida no VFT. ....	57
Figura 4.26 – Defasagem angular no VFT (graus). ....	57
Figura 4.27 – Potência mecânica entregue ao VFT pelo servo motor. ....	58
Figura 4.28 – Velocidade do rotor do VFT em pu. ....	59
Figura 4.29 – Torque aplicado ao eixo do VFT pelo servo motor. ....	59
Figura 4.30 – Tensão nos terminais do VFT. ....	60
Figura 4.31 – Potência de referência e medida no VFT. ....	61
Figura 4.32 – Defasagem angular no VFT (graus). ....	61
Figura 4.33 - Potência mecânica entregue ao VFT pelo servo motor. ....	62

Figura 4.34 – Velocidade do rotor do VFT em pu.....	62
Figura 4.35 – Torque aplicado ao eixo do VFT pelo servo motor. ....	63
Figura 4.36 – Tensão nos terminais do VFT. ....	63
Figura 4.37 – Sinal de referência e potência ativa no VFT.....	64
Figura 4.38 – Defasagem angular no VFT (graus). ....	65
Figura 4.39 – Potência mecânica entregue ao VFT pelo servo motor. ....	65
Figura 4.40 – Velocidade do rotor do VFT em pu.....	66
Figura 4.41 - Torque aplicado ao eixo do VFT pelo acionamento eletromecânico. ....	66
Figura 4.42 – Tensão nos terminais do VFT. ....	67
Figura 4.43 – Sinais de Referência e de potência ativa no VFT para as situações.....	68
Figura 5.1 – Modelo para simulações em PSCAD/EMTDC do VFT.....	69
Figura 5.2 – Diagrama trifilar do sistema mais o controle desenvolvido para as simulações de transitórios eletromagnéticos no PSCAD/EMTDC. ....	71
Figura 5.3 – Sinal de referência de potência e a potência ativa no VFT (PSCAD/EMTDC).....	73
Figura 5.4 – Comparativo entre as potências. ....	73
Figura 5.5 – Defasagem angular no VFT em graus (PSCAD/EMTDC). ....	74
Figura 5.6 – Comparativo entre as defasagens angulares. ....	74
Figura 5.7 – Potência mecânica entregue ao VFT pelo servo motor (PSCAD/EMTDC). .....	75
Figura 5.8 – Comparativo entre as potências mecânicas. ....	75
Figura 5.9 – Velocidade do rotor do VFT em pu (PSCAD/EMTDC).....	76
Figura 5.10 – Comparativo entre as velocidades.....	76
Figura 5.11 – Torque aplicado ao eixo do VFT pelo servo motor (PSCAD/EMTDC)..	77
Figura 5.12 – Comparativo entre os torques. ....	77
Figura 5.13 – Tensão nos terminais do VFT (PSCAD/EMTDC).....	78
Figura 5.14 – Envoltória da tensão instantânea nos terminais do VFT conectados ao sistema 1 (PSCAD/EMTDC). ....	78
Figura 5.15 – Tensão instantânea nos terminais do VFT conectados ao sistema 1 (PSCAD/EMTDC).....	79
Figura 5.16 – Envoltória da corrente instantânea nos terminais do VFT conectados ao sistema 1 (PSCAD/EMTDC). ....	79
Figura 5.17 – Sinal de referência de potência e a potência ativa no VFT.....	81

Figura 5.18 – Ampliação do sinal de referência de potência e a potência ativa no VFT no instante de curto-circuito monofásica. ....	82
Figura 5.19 – Defasagem angular no VFT (graus). ....	82
Figura 5.20 – Potência mecânica entregue ao VFT pelo servo motor. ....	83
Figura 5.21 – Ampliação do sinal de potência mecânica entregue ao VFT pelo servo motor no instante de curto-circuito monofásico. ....	83
Figura 5.22 – Velocidade do rotor do VFT em pu. ....	84
Figura 5.23 – Torque aplicado ao eixo do VFT pelo servo motor. ....	84
Figura 5.24 – Ampliação do sinal torque aplicado ao eixo do VFT pelo servo motor no instante de curto-circuito monofásico. ....	85
Figura 5.25 – Tensão nos terminais do VFT. ....	86
Figura 5.26 – Envoltória da tensão instantânea nos terminais do VFT conectados ao sistema 1. ....	86
Figura 5.27 – Tensão instantânea nos terminais do VFT conectados ao sistema 1. ....	87
Figura 5.28 – Envoltória da corrente instantânea nos terminais do VFT conectados ao sistema 1. ....	87
Figura 5.29 – Corrente instantânea nos terminais do VFT conectados ao sistema 1. ....	88

# ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros do VFT para regime permanente [15] .....	29
Tabela 2 : Parâmetros do VFT para regime dinâmico [15].....	39
Tabela 3 : Parâmetros do controle em conexões síncronas .....	42
Tabela 4 : Parâmetros do controle em conexões assíncronas.....	56
Tabela 5 : Parâmetros do VFT para transitórios eletromagnéticos[15] .....	70

# LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

VFT	<i>Variable Frequency Transformer</i>
CCAT	Transmissão de Energia em Corrente Contínua em Alta Tensão
$I_d, I_q$	Correntes no referencial de Park
s	Escorregamento
$V_d, V_q$	Tensões no referencial de Park
$\omega_m$	Velocidade de rotação em rad/s
$\omega_R$	Frequência de alimentação do rotor
$\omega_{Ref}$	Velocidade angular do referencial de Park
$\omega_S$	Frequência de alimentação do estator
$\lambda_d, \lambda_q$	Enlaces de fluxo no referencial de Park
$\lambda_R, \lambda_S$	Enlaces de fluxo do rotor e estator
M	Indutância mutua cíclica
$L_{ST}$	Indutância própria do estator
$L_{RT}$	Indutância própria do rotor
$L_{SR}$	Indutância mútua entre cada fase do estator e as fases do rotor
p	Número de pólos
$T_e$	Torque eletromagnético
$P_{VFT}$	É a potência que flui pelo VFT, do estator para o rotor
$V_S$ e $V_R$	São as magnitudes das tensões nos terminais do estator e do rotor
$\theta_S$	É o ângulo de fase da tensão do estator em relação à referência
$\theta_R$	É o ângulo de fase da tensão do rotor em relação à referência



$\theta_{RM}$	É o ângulo mecânico de fase do rotor da máquina em relação ao estator
$P_S$	Potência elétrica que sai dos enrolamentos do estator
$P_R$	Potência elétrica que sai dos enrolamentos do rotor
$P_D$	Potência mecânica para o controle-torque do acionamento eletromecânico, eventualmente aparecendo como a potencia elétrica trocada entre o sistema o qual o acionamento eletromecânico está conectado
$N_S$	Número de espiras do enrolamento do estator
$N_R$	Número de espiras do enrolamento do rotor
$I_S$	Corrente que sai do enrolamento do estator
$I_R$	Corrente que sai do enrolamento do rotor
$V_S$	Tensão no enrolamento do estator
$V_R$	Tensão no enrolamento do rotor
$\Psi_A$	Fluxo no entreferro do VFT
$f_{RM}$	Frequência de rotação do rotor, em Hz
$f_S$	Frequência da tensão do estator, em Hz
$f_R$	Frequência da tensão do rotor, em Hz
$N_p$	Número de pólos do transformador rotativo (máquina de indução duplamente alimentada)
$\omega_{RM}$	Velocidade de rotação do rotor, em rpm

### **Símbolos em índice**

S	Estator
R	Rotor

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

A proposta deste Capítulo é apresentar e contextualizar os objetivos e motivações acerca do trabalho (utilização do transformador de frequência variável na interligação de sistemas elétricos). Além da identificação do problema, das motivações e dos objetivos, o Capítulo traz a estrutura simplificada da dissertação de mestrado.

### 1.1 Identificação do problema

A grande demanda por energia elétrica, o aumento da preocupação ambiental e o ambiente de negócios estão forçando os sistemas de potência a se expandirem por meio de novas interconexões e com a participação de outros tipos de equipamentos. Entretanto, a operação destes sistemas interconectados representa um grande desafio, já que as frequências e o fluxo nos troncos da ligação devem ser firmemente mantidos, não somente para satisfazer o crescimento da carga e o incremento da transferência de potência, mas também porque as cargas são variáveis.

Neste contexto, onde o controle de potência e frequência são fundamentais para o funcionamento normal do sistema, duas tecnologias destacam-se para a resolução deste problema, ou seja, conectar sistemas assíncronos: o elo CCAT (Transmissão de Energia em Corrente Contínua em Alta Tensão) e o Transformador de Frequência Variável, conhecido como VFT (do inglês *Variable Frequency Transformer*).

O método convencional utilizado para conectar sistemas assíncronos é através de um elo CCAT, que utiliza conversores de corrente alternada para corrente contínua e vice-versa. O controle do fluxo de potência é feito pela regulação do ângulo de disparo dos tiristores.

Também são viáveis interligações assíncronas em corrente alternada, que são baseadas em máquinas rotativas. Um exemplo é o VFT, dispositivo que permite transferir energia entre dois pontos do sistema, podendo estabelecer fluxo de potência ativa em ambas as direções e de forma controlada [2, 3 e 4]. O primeiro VFT comercial foi instalado na subestação de Langlois da Hydro-Quebec. O equipamento foi

dimensionado para transferir 100 MW entre os sistema de Quebec (Canadá) e a rede de Nova York (Estados Unidos) [2, 3 e 15].

A fim de interligar sistemas assíncronos e com controle preciso, ágil e desacoplado na interligação de sistemas, a utilização das tecnologias CCAT ou VFT são a solução.

## 1.2 Motivação

A identificação do problema – interligação de sistemas assíncronos com controle do fluxo de potência – instigou a pesquisa por sistemas alternativos. Neste contexto, entra o Transformador de Frequência Variável ou VFT (*Variable Frequency Transformer*), equipamento que permite a interligação de sistemas assíncronos de forma não convencional por meio da corrente alternada e de uma máquina rotativa, tornando-se uma alternativa funcional ao CCAT.

Convencionalmente, a alternativa mais utilizada para interconexão de sistemas assíncronos com controle do fluxo de potência é através de um CCAT. Este equipamento conecta dois sistemas assíncronos através de um *link CC* e controla o fluxo de potência por meio do ângulo de disparo dos tiristores, presentes nos conversores (retificador e inversor), os quais se encontram localizados na mesma subestação.

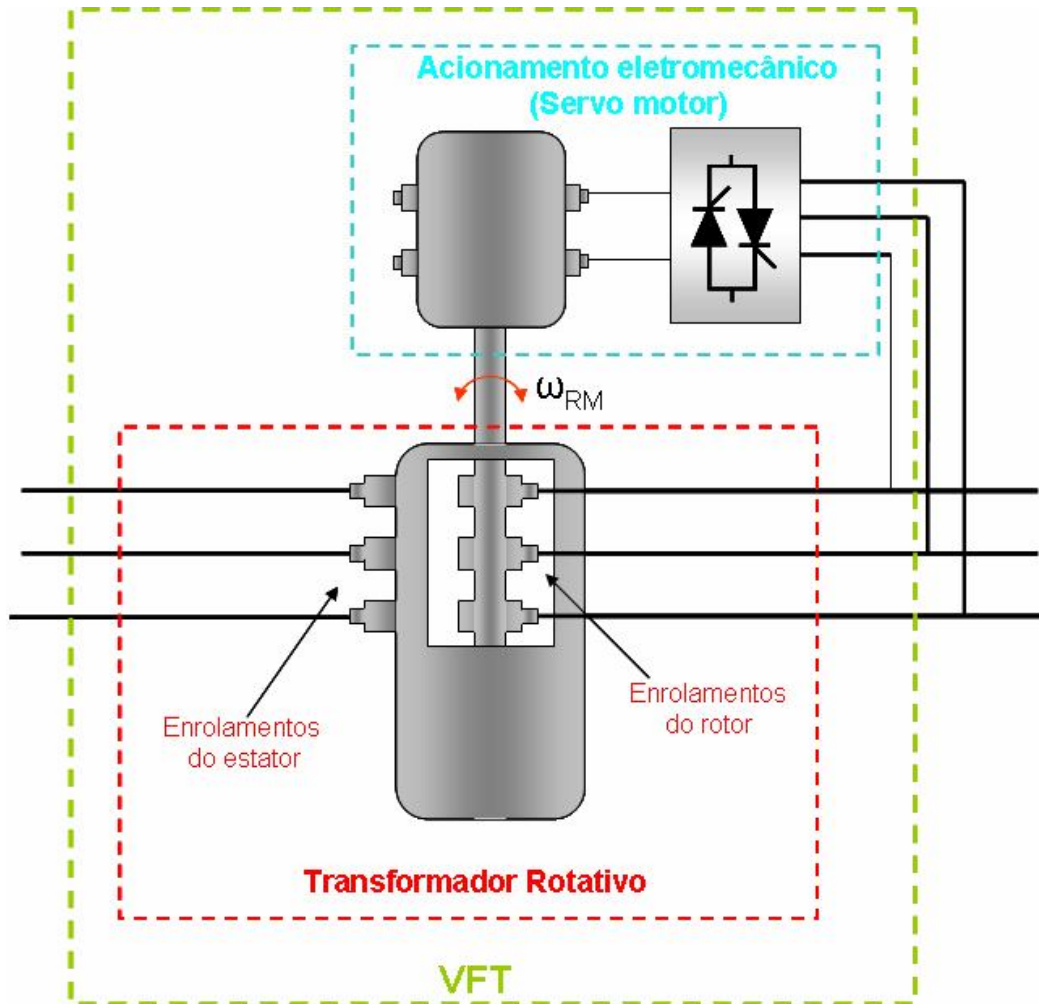
Recentemente, o VFT foi desenvolvido como alternativa para conexão de sistemas assíncronos, utilizando uma máquina rotativa, com a funcionalidade de controle do fluxo de potência. Este equipamento é um dispositivo controlável para transmissão bidirecional de energia, que pode conectar sistemas síncronos ou assíncronos [2, 3, 15 e 18].

O primeiro VFT comercial foi instalado na subestação de Langlois da Hydro-Quebec com capacidade de transferir energia entre os sistemas assíncronos de Quebec (Canadá) e dos Estados Unidos. Este VFT está em operação desde abril de 2004 e foi dimensionado para transferir 100 MVA entre estas duas redes [2]–[8].

Essencialmente, o VFT é um transformador defasador rotativo, que pode operar para um ângulo de fase regulável. Seu principal elemento é o transformador rotativo (Máquina de indução duplamente alimentada), máquina elétrica com enrolamentos trifásicos acessíveis no rotor e no estator. Em seus terminais conectam-se, através de transformadores elevadores, os barramentos das subestações entre as quais se pretende estabelecer o fluxo de energia. Mecanicamente acoplada ao eixo, um acionamento

eletromecânico ajusta a posição relativa dos campos do rotor e do estator, agregando controle contínuo do fluxo de energia entre os dois sistemas [2]–[8].

Em suma, o VFT é a composição do transformador rotativo (máquina duplamente alimentada) mais um sistema de acionamento eletromecânico (máquina aplicadora de torque mais acionamento eletrônico), sendo este utilizado para aplicação e controle do torque, conforme mostrado na Figura 1.1 a seguir.



**Figura 1.1 – Principais componentes do VFT**

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, ou seja, em corrente alternada). De uma forma geral, no que se refere à capacidade de

transferir/controlar o fluxo de potência ativa em interligações, o VFT apresenta as mesmas funcionalidades de um sistema CCAT.

O desempenho do VFT na conexão de sistemas elétricos mostra-se bastante satisfatório [6]-[19]. Além disso, a literatura indica que a simplicidade construtiva do VFT, e a sua reduzida necessidade de manutenção são suas principais vantagens [2, 17 e 25]. Outros benefícios: menor área ocupada por uma subestação de um VFT, quando comparada a uma subestação de um sistema CCAT de mesma potência; VFT não injeta harmônicos em quantidade significativa na rede elétrica; relativa estabilidade do VFT frente a distúrbios nos sistemas, incluindo curtos-circuitos; etc.

### **1.3 Objetivo**

A proposta desta dissertação de mestrado é analisar em detalhes o VFT como uma alternativa capaz de conectar sistemas síncronos e assíncronos, diferentemente do método convencional, que o faz por meio de um CCAT. A maioria dos trabalhos publicados comenta apenas o CCAT como interligador de sistemas assíncronos. Além disso, o VFT apresenta as mesmas funcionalidades de um sistema CCAT.

Ao longo dos Capítulos, mostra-se o funcionamento do VFT em regime permanente, em transitórios eletromecânicos e transitórios eletromagnéticos para diversas situações. Para tanto, foram utilizados alguns softwares desenvolvidos pelo CEPEL (Centro de Pesquisas Elétricas): o ANAREDE [43] para regime permanente; o ANATEM [44] para transitórios eletromecânicos; e, por fim, o PSCAD/EMTDC para transitórios eletromagnéticos.

### **1.4 Estrutura do Texto**

O texto desta dissertação foi organizado em Capítulos, que possuem o conteúdo resumido nos parágrafos seguintes.

O Capítulo 2 apresenta a teoria básica do VFT, seu funcionamento, sua relevância e possibilidades de utilização para interligação entre sistemas elétricos (síncronos e assíncronos), os principais equipamentos que compõem o VFT tais como o transformador rotativo (máquina de indução duplamente alimentada), o servo motor e o controle.

O Capítulo 3 descreve o desempenho do VFT em regime permanente no software ANAREDE [43]. Nesta parte do texto são feitas simulações para o fluxo com variação entre 0 e 100%, além de serem avaliados os efeitos da variação do Nível de Curto-Circuito e da Conexão da Compensação *shunt*.

O Capítulo 4 apresenta resultados de simulações digitais realizadas no ANATEM [44] que visam ilustrar o desempenho do VFT quando da conexão de sistemas elétricos. Os resultados apresentados incluem o comportamento transitório das principais grandezas do VFT perante alguns distúrbios típicos na rede.

O Capítulo 5 apresenta resultados de simulações digitais realizadas no PSCAD/EMTDC que ilustram o desempenho do VFT quando a ocorrência dos eventos de variação em degrau da potência e falta monofásica.

No Capítulo 6 seguem-se as principais conclusões obtidas com relação ao tema desenvolvido e são apresentadas algumas sugestões para a continuidade do trabalho.

## **CAPÍTULO 2**

# **PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DO VFT**

Como exposto no Capítulo 1, o VFT é um dispositivo controlável para transmissão bidirecional que pode transmitir potência entre sistemas elétricos. A construção do VFT é similar a de uma máquina assíncrona de rotor bobinado convencional. A potência elétrica é trocada entre as duas redes que este equipamento interliga através do acoplamento magnético, ou seja, através de seu entreferro.

Apesar da concepção do VFT ser nova, ele consiste de tecnologias bem estabelecidas como a máquina de indução e o servo motor (máquina mais acionamento eletrônico).

Essencialmente o VFT é um transformador defasador, que pode operar para um ângulo de fase regulável. Uma aplicação direta para o VFT é como um transformador defasador conectando dois sistemas operando com a mesma frequência e controlando o fluxo de potência.

A versatilidade do VFT, entretanto, é conectar dois sistemas assíncronos. O método convencional para conectar dois sistemas assíncronos é usar um CCAT, ou seja, o VFT apresenta as mesmas funcionalidades de um sistema back-to-back CCAT.

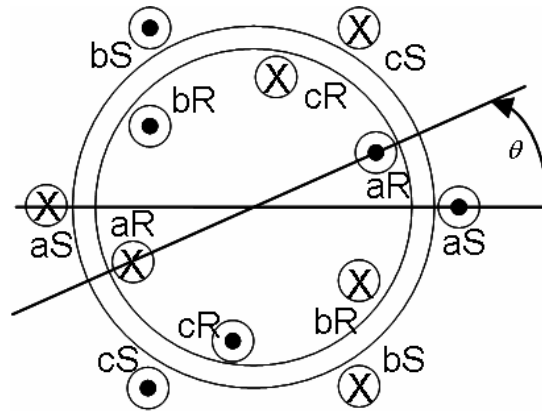
Neste Capítulo, será apresentada uma visão global dos principais equipamentos que compõem o VFT com suas funcionalidades, além de algumas aplicações. Nas seções seguintes são apresentados: o transformador rotativo, assim como suas equações; os principais servo motores, tais como as máquinas elétricas utilizadas e os seus conversores; e o controle.

### **2.1 Transformador Rotativo**

O VFT pode ser entendido pelo conjunto formado por uma máquina de indução duplamente alimentada (transformador rotativo) mais um servo motor, sendo este destinado à aplicação e controle do torque em seu eixo.

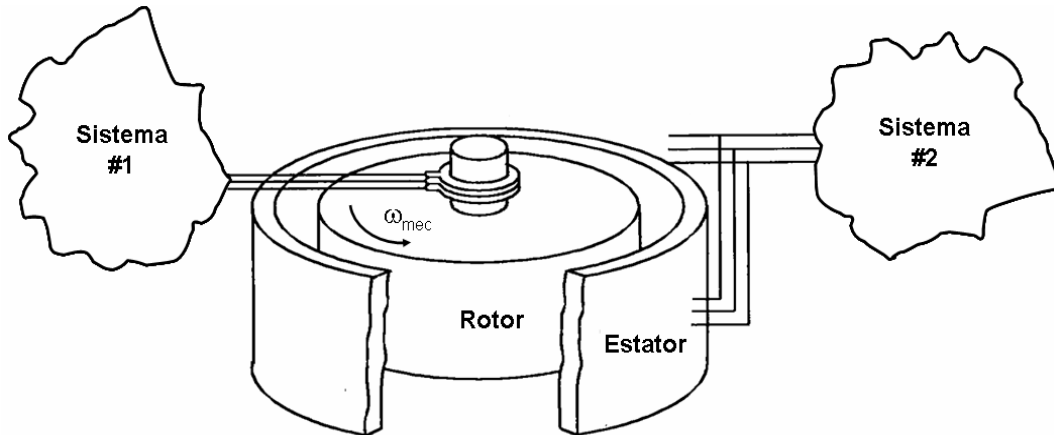
Seu principal componente é o transformador rotativo, máquina de indução duplamente alimentada com os enrolamentos do rotor e estator semelhantes e acessíveis.

Ou seja, três enrolamentos isolados distribuídos ao longo da periferia e defasados no espaço de  $120^\circ$  elétricos, conforme ilustrado na Figura 2.1.



**Figura 2.1 - Corte esquemático do transformador rotativo**

A Figura 2.2 apresenta como são conectados os barramentos do sistema aos terminais trifásicos (estator e rotor) do transformador rotativo. Os terminais do rotor conectam-se com o exterior através de três anéis e escovas, uma vez que o rotor pode mover-se livremente com relação ao estator.



**Figura 2.2 - Ligação entre sistemas através do transformador rotativo (Máquina de indução duplamente alimentada)**

As principais funções do transformador rotativo são viabilizar a interligação entre os sistemas elétricos e proporcionar a transferência de energia entre os sistemas a ele interligados. Para tal, faz-se necessário a utilização de um servo motor para aplicação e controle do torque no eixo da máquina de indução (transformador rotativo), o qual será explicado em detalhes posteriormente.



A próxima Seção traz algumas considerações preliminares para modelagem matemática do transformador rotativo.

### **2.1.1 Considerações Iniciais**

Conforme exposto anteriormente, o transformador rotativo é uma máquina de indução constituída de dois enrolamentos trifásicos, um no rotor e outro no estator.

Para a representação matemática do transformador rotativo, algumas considerações são apresentadas:

- Os três enrolamentos são iguais entre si, tanto no estator quanto no rotor;
- Os ângulos elétricos entre os três enrolamentos do estator são iguais entre si e idem para o rotor;
- O entreferro é considerado constante;
- O circuito magnético é considerado ideal, não existe saturação;
- A distribuição da densidade de fluxo magnético no entreferro é radial e senoidal;
- Não são consideradas perdas magnéticas.

### **2.1.2 Representação Física do Transformador Rotativo**

A representação física do transformador rotativo (Máquina de indução duplamente alimentada) pode ser vista na Figura 2.3. As variáveis do estator são representadas em um sistema de três eixos simétricos defasados de  $120^\circ$  entre si e estacionários; com as tensões  $V_{aS}$ ,  $V_{bS}$ ,  $V_{cS}$  e as correntes  $I_{aS}$ ,  $I_{bS}$  e  $I_{cS}$ . O rotor é representado em um sistema de três eixos simétricos defasados de  $120^\circ$  e girantes com o rotor, e as tensões  $V_{aR}$ ,  $V_{bR}$ ,  $V_{cR}$  e as correntes  $I_{aR}$ ,  $I_{bR}$ ,  $I_{cR}$  representam as grandezas do rotor. Nesta máquina os terminais dos enrolamentos do estator e do rotor são acessíveis e estão ligados em estrela.

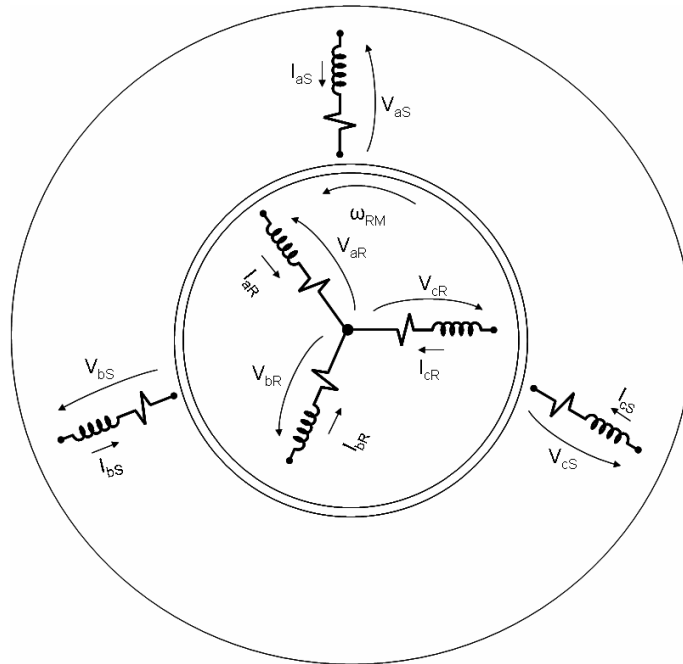


Figura 2.3 – Representação física do transformador rotativo

### 2.1.3 Circuito Equivalente em Coordenadas abc

Para obter as equações do transformador rotativo nas coordenadas  $dq$  no referencial genérico, é necessário obter primeiramente as equações do rotor e do estator em coordenadas  $abc$ . As equações da tensão em  $abc$  são obtidas a partir do circuito equivalente mostrado na Figura 2.4.

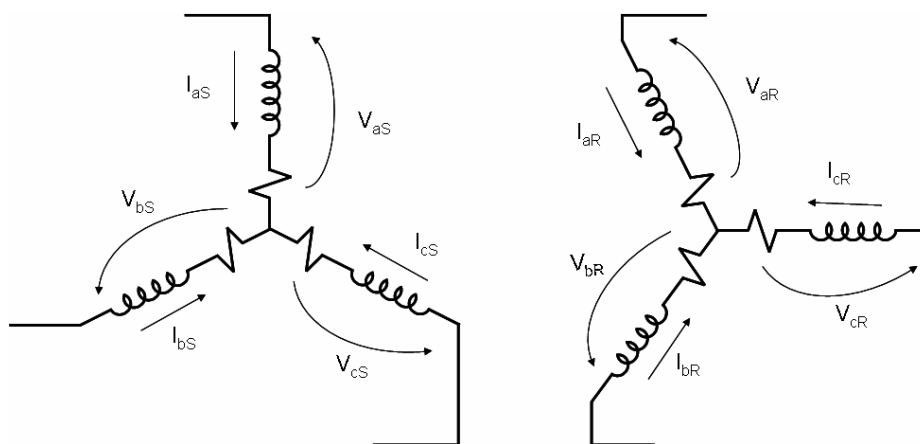


Figura 2.4 – Circuito equivalente em coordenadas abc

Aplicando as leis de Kirchhoff no circuito equivalente, apresentado na Figura 2.4, obtêm-se as equações das tensões no estator e no rotor em  $abc$ , dadas por:

$$V_{abcS} = r_S I_{abcS} + \frac{d}{dt} \lambda_{abcS} \quad (2-1)$$

$$V_{abcR} = r_R I_{abcR} + \frac{d}{dt} \lambda_{abcR} \quad (2-2)$$

O principal inconveniente desta representação é que as indutâncias mútuas são variantes com a posição do rotor. Elimina-se este inconveniente, representando as variáveis do rotor e do estator em um único referencial, que pode estar em qualquer velocidade.

### 2.1.4 Relação de Transformação

Para facilitar a análise matemática, é conveniente referir as equações do rotor para o estator. Referindo as variáveis do rotor para o estator, tem-se:

$$I'_{dqR} = \frac{N_R}{N_S} I_{dqR} \quad (2-3)$$

$$V'_{dqR} = \frac{N_S}{N_R} V_{dqR} \quad (2-4)$$

$$\lambda'_{dq0R} = \frac{N_S}{N_R} \lambda_{dq0R} \quad (2-5)$$

onde,  $N_S$  e  $N_R$  representam o número de espiras do enrolamento estator e do rotor, respectivamente, e o símbolo ( $'$ ) indica que as variáveis estão referidas ao estator.

### 2.1.5 Modelo do Transformador Rotativo

Como exposto na Seção 2.1.3, o principal inconveniente de representar as equações do rotor e do estator em coordenadas  $abc$  é que as indutâncias mútuas são variantes com a posição do rotor. A solução para este tipo de problema é a utilização de uma mudança de coordenadas, de maneira a reduzir a complexidade do sistema de equações e eliminar termos que variam com o tempo, conforme descrito em [27, 30 e 33].

A transformada de PARK permite substituir as variáveis, associadas às fases, por variáveis associadas a enrolamentos fictícios girantes ou, em outras palavras, referir o

sistema de variáveis  $abc$  a um sistema girante, podendo ser solidário a qualquer referencial, desde que seja conhecida a posição desse referencial.

### 2.1.5.1 Equações Diferenciais no Referencial Genérico

O modelo matemático a ser derivado permite descrever o comportamento dinâmico da máquina. É possível assim definir como a máquina responde a determinadas variações, como por exemplo, na tensão e frequência de alimentação. A influência na resposta da máquina de cada um destes parâmetros também pode ser estudada. E é através desta modelagem que estratégias de controle poderão ser definidas. Este trabalho de modelagem foi realizado de acordo com [27, 30 e 33].

#### 2.1.5.1.1 Equações das Tensões no Referencial Genérico

As equações da tensão em coordenadas  $dq0$  orientadas em um referencial genérico são dadas por:

$$V_{dS} = r_S I_{dS} + \frac{d}{dt} \lambda_{dS} - \omega_{Ref} \lambda_{qS} \quad (2-6)$$

$$V_{qS} = r_S I_{qS} + \frac{d}{dt} \lambda_{qS} + \omega_{Ref} \lambda_{dS} \quad (2-7)$$

$$V_{0S} = r_S I_{0S} + \frac{d}{dt} \lambda_{0S} \quad (2-8)$$

$$V'_{dR} = r'_R I'_{dR} + \frac{d}{dt} \lambda'_{dR} - (\omega_{Ref} - \omega_R) \lambda'_{qR} \quad (2-9)$$

$$V'_{qR} = r'_R I'_{qR} + \frac{d}{dt} \lambda'_{qR} + (\omega_{Ref} - \omega_R) \lambda'_{dR} \quad (2-10)$$

$$V'_{0R} = r'_R I'_{0R} + \frac{d}{dt} \lambda'_{0R} \quad (2-11)$$

#### 2.1.5.1.2 Equações dos Fluxos no Referencial Genérico

Da mesma forma, as equações dos fluxos concatenados do estator e rotor do transformador rotativo são dadas por:

$$\lambda_{dS} = L_{ST} I_{dS} + M I'_{dR} \quad (2-12)$$

$$\lambda_{qS} = L_{ST} I_{qS} + M I'_{qR} \quad (2-13)$$

$$\lambda_{oS} = L_{IS} I_{oS} \quad (2-14)$$

$$\lambda'_{dR} = L_{RT} I'_{dR} + M I_{dS} \quad (2-15)$$

$$\lambda'_{qR} = L_{RT} I'_{qR} + M I_{qS} \quad (2-16)$$

$$\lambda'_{oR} = L'_{IR} I'_{oR} \quad (2-17)$$

### 2.1.5.1.3 Equações do Torque Eletromagnético, da Potência Ativa e Reativa no Referencial Genérico

O torque eletromagnético para o transformador rotativo no referencial genérico é dado por:

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) M (I_{qS} I'_{dR} - I_{dS} I'_{qR}). \quad (2-18)$$

ou de forma equivalente, substituindo (2-15) e (2-16) em (2-18) tem-se que:

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) (\lambda'_{qR} I'_{dR} - \lambda'_{dR} I'_{qR}). \quad (2-19)$$

ou ainda, substituindo (2-12) e (2-13) em (2-19) obtém-se:

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) (\lambda_{dS} I_{qS} - \lambda_{qS} I_{dS}). \quad (2-20)$$

As equações da potência ativa e reativa em coordenadas síncronas no referencial genérico são dadas por:

$$P_S = \frac{3}{2} (V_{qS} I_{qS} + V_{dS} I_{dS}), \quad (2-21)$$

e

$$Q_S = \frac{3}{2} (V_{qS} I_{dS} - V_{dS} I_{qS}). \quad (2-22)$$

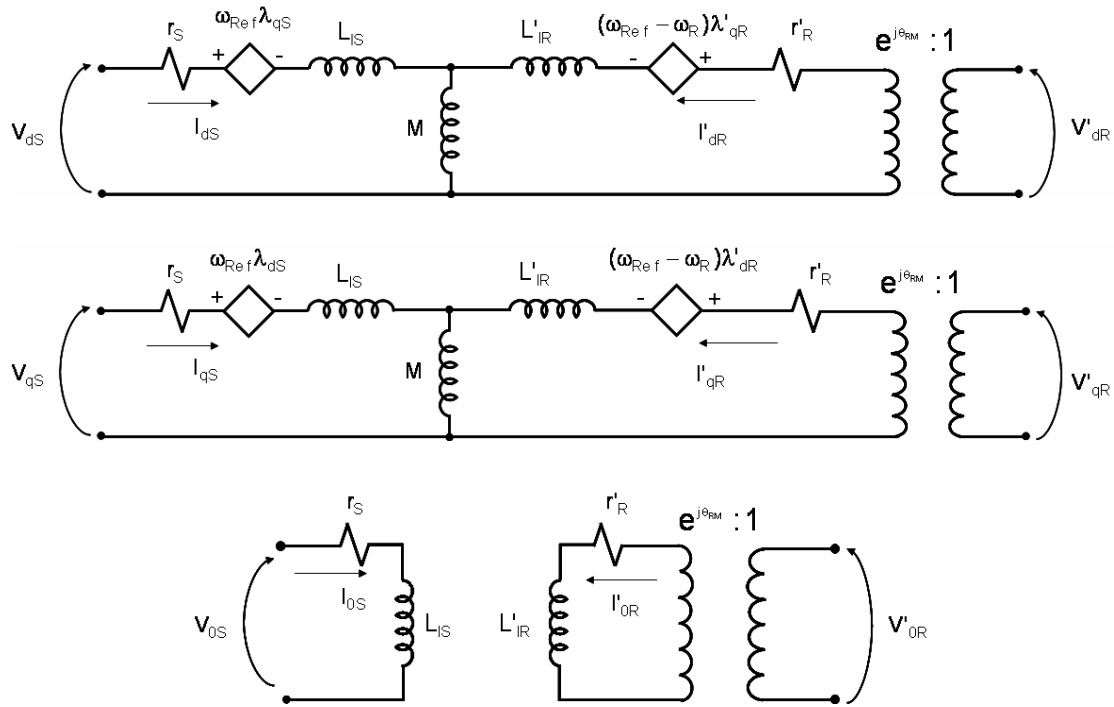
Igualmente importante são as equações das potências ativa e reativa no rotor do transformador rotativo, que são dadas por:

$$P_R = \frac{3}{2} (V'_{qR} I'_{qR} + V'_{dR} I'_{dR}), \quad (2-23)$$

e

$$Q_R = \frac{3}{2} (V'_{qR} I'_{dR} - V'_{dR} I'_{qR}). \quad (2-24)$$

O circuito equivalente do transformador rotativo em coordenadas síncronas  $dq$  orientado no referencial genérico pode ser visto na Figura 2.5.



**Figura 2.5 – Circuito elétrico equivalente do transformador rotativo em coordenadas dq orientadas no referencial genérico**

Na próxima Seção, são apresentadas as equações para operação em regime permanente.

### 2.1.6 Operação em Regime Permanente

Para aplicações em regime permanente, o modelo pode ser simplificado, eliminando-se alguns termos. Admitindo-se que o sistema está balanceado, pode-se desprezar a componente de seqüência zero. Por estar em regime permanente, pode-se ainda adotar  $d/dt = 0$ . Retomando, então, as equações de tensão e de fluxo e considerando o eixo girante como estando em sincronismo com o estator, obtêm-se as tensões nos eixos em função das correntes de estator e de rotor:

$$V_{dS} = r_S I_{dS} - \omega_S L_{ST} I_{qS} - \omega_S M I'_{qR}, \quad (2-25)$$

$$V_{qS} = r_S I_{qS} + \omega_S L_{ST} I_{dS} + \omega_S M I'_{dR}, \quad (2-26)$$

$$V'_{dR} = r'_R I'_{dR} - \omega_S L_{RT} I'_{qR} - \omega_S M I_{qS}, \quad (2-27)$$

e

$$V'_{qR} = r'_R I'_{qR} + \omega_S L_{RT} I'_{dR} + \omega_S M I_{dS}. \quad (2-28)$$

Sendo

$$L_{ST} = (L_{IS} + \frac{3}{2} L_S), \quad (2-29)$$

$$L_{RT} = (L'_{IR} + \frac{3}{2} L'_R), \quad (2-30)$$

e

$$M = \frac{3}{2} L_{SR}. \quad (2-31)$$

Definindo-se:

$$\hat{V}_S = V_{dS} + jV_{qS}, \quad (2-32)$$

$$\hat{I}_S = I_{dS} + jI_{qS}, \quad (2-33)$$

$$\hat{V}_R = V'_{dR} + jV'_{qR}, \quad (2-34)$$

e

$$\hat{I}_R = I'_{dR} + jI'_{qR}. \quad (2-35)$$

Para as tensões no rotor e no estator, de acordo com a Figura 2.6 tem-se:

$$\hat{V}_S = (r_S + j\omega_S L_{ST}) \hat{I}_S + j\omega_S M \hat{I}_R, \quad (2-36)$$

e

$$\hat{V}_R = (r'_R + js\omega_S L'_{RT}) \hat{I}_R + js\omega_S M \hat{I}_S. \quad (2-37)$$

Dividindo (2-37) por  $s$ , chega-se a:

$$\frac{\hat{V}_R}{s} = (\frac{r'_R}{s} + j\omega_S L'_{RT}) \hat{I}_R + j\omega_S M \hat{I}_S. \quad (2-38)$$

As expressões (2-36) e (2-38) podem ser representadas através de um circuito equivalente apresentado na Figura 2.6.

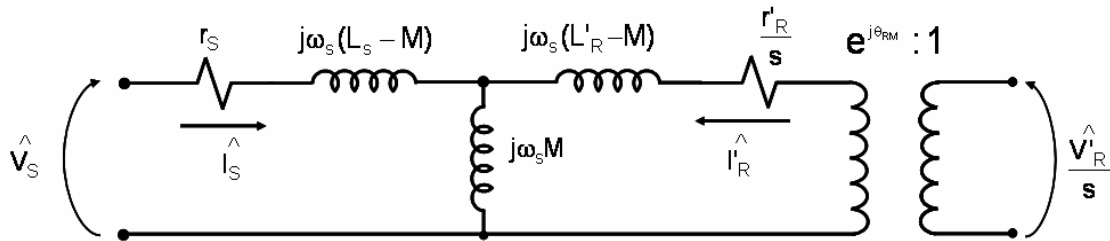


Figura 2.6 – Circuito equivalente do transformador rotativo

A partir do circuito da Figura 2.6, pode-se definir:

$$\omega_s (L_{ST} - M) = X_s, \quad (2-39)$$

$$\omega_s (L_{RT} - M) = X_R, \quad (2-40)$$

e

$$\omega_s M = X_m. \quad (2-41)$$

O circuito equivalente passa a ser como mostrado na Figura 2.7.

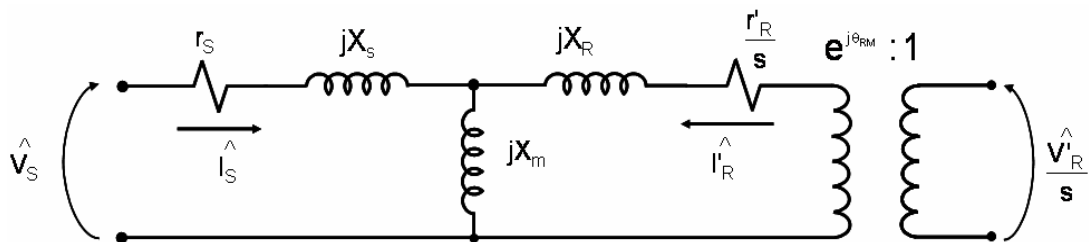


Figura 2.7 – Circuito equivalente com parâmetros redefinidos

Sendo  $\theta_{RM}$  o ângulo mecânico de fase do rotor da máquina em relação ao estator.

### 2.1.7 Alternativas de Interligação de Sistemas Elétricos Utilizando o Transformador Rotativo

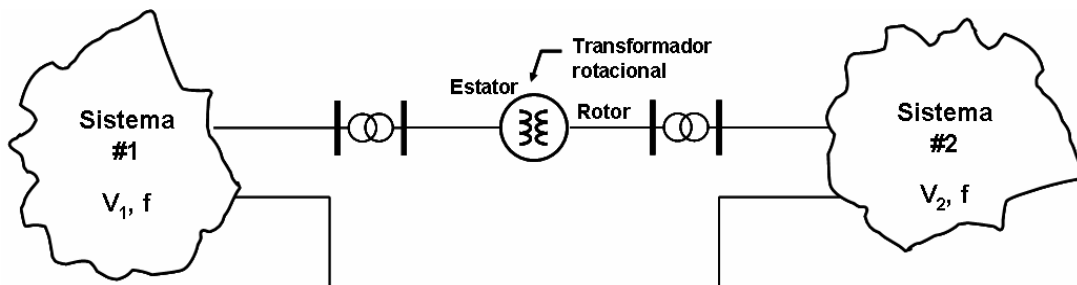
De acordo com o que foi apresentado anteriormente, o núcleo da tecnologia do VFT é o transformador rotativo (máquina de indução duplamente alimentada), que, por sua vez, através de seu acoplamento magnético - seu entreferro -, possibilita a interligação entre os sistemas elétricos, mas sem o controle do fluxo de potência na interligação. Para que isto seja possível, é necessária a aplicação de torque externo no eixo do transformador rotativo.



Um servo motor é usado para aplicar torque continuamente em ambas as direções e, através dele, controlar a direção e a magnitude do fluxo de potência que atravessa o equipamento.

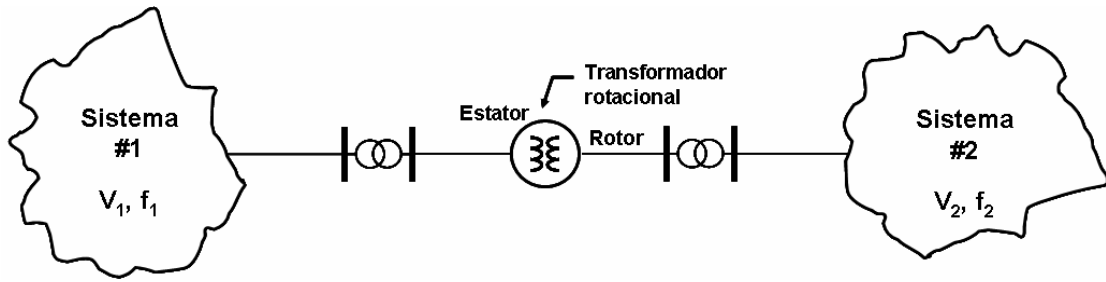
Para melhor entendimento dos fenômenos envolvidos na operação do VFT, trataremos inicialmente das características gerais do transformador rotativo aplicado à conexão de sistemas elétricos síncronos ou assíncronos.

As Figuras 2.8 e 2.9 apresentam duas alternativas para interligação de sistemas elétricos utilizando o transformador rotativo. A Figura 2.8 ilustra uma conexão síncrona, na qual os sistemas envolvidos encontram-se sincronizados através de uma interligação convencional.



**Figuras 2.8 – Interligação síncrona**

A Figura 2.9 ilustra uma interligação assíncrona. As frequências  $f_1$  e  $f_2$  referentes aos sistemas 1 e 2 podem ser diferentes. A frequência de escorregamento entre estes dois barramentos pode ser definida pela diferença instantânea das frequências em cada um dos barramentos. Entretanto, a conexão só é viável por causa do transformador rotativo (máquina duplamente alimentada), já que o rotor da máquina gira na velocidade correspondente à frequência de escorregamento dos sistemas envolvidos, ou seja, o destino de toda diferença de frequência é o rotor [13].



Figuras 2.9 – Interligação assíncrona

Na próxima Seção, são apresentadas as equações que determinam a velocidade de rotação do rotor do transformador rotativo.

### 2.1.8 Velocidade de Rotação do Rotor

Quando são conectados dois sistemas assíncronos aos terminais do transformador rotativo, o rotor da máquina gira na velocidade correspondente à frequência de escorregamento dos sistemas envolvidos, a qual é definida pela diferença instantânea das frequências verificadas em cada um dos sistemas. Em uma interligação síncrona, o rotor permanece inerte (frequência de escorregamento igual à zero).

As equações a seguir relacionam, em regime permanente, a velocidade do rotor do transformador rotativo com a diferença de frequência entre os sistemas a ele associados [8, 13]:

$$f_{RM} = f_S - f_R \quad (2-42)$$

$$\omega_{RM} = f_{RM} \cdot \frac{120}{N_P} \quad (2-43)$$

onde,

$f_S$       Frequência elétrica da tensão do estator, em Hz;

$f_R$       Frequência elétrica da tensão do rotor, em Hz;

$f_{RM}$      Frequência de rotação do rotor, em Hz;

$N_P$       Número de pólos do transformador rotativo;

$\omega_{RM}$     Velocidade de rotação do rotor, em rpm.

A equação (2-43) indica que a velocidade do rotor do transformador rotativo é proporcional ao escorregamento de frequência verificado entre os dois sistemas. Assim, a velocidade do rotor será zero em uma conexão síncrona. Já em uma conexão assíncrona, a velocidade de rotação do rotor será diferente de zero.

Usando como exemplo a interligação assíncrona entre os sistemas de Quebec (Canadá) e dos Estados Unidos, considerando que nesta interligação o desvio de frequência seja de 0,4 Hz ( $f_1 = 60,2\text{Hz}$  e  $f_2 = 59,8\text{ Hz}$ ) e que o transformador rotativo (máquina duplamente alimentada) possua quatro pólos. De (2-42) e (2-43) obtém-se uma velocidade de 12 rpm no eixo do transformador rotativo.

Ao analisar (2-43), observa-se que a velocidade de 12 rpm poderia ser ainda menor, pois a velocidade de rotação do rotor é inversamente proporcional ao  $N_p$  (número de pólos da máquina duplamente alimentada). Ao aumentar o  $N_p$  para 20, a velocidade reduziria em cinco vezes, ou seja, cairia para 2,4 rpm. Assim, se o VFT for utilizado para interligar sistemas assíncronos com desvios de frequências de 10 Hz ( $f_1 = 60\text{ Hz}$  e  $f_2 = 50\text{ Hz}$ ), uma saída para diminuir a velocidade de rotação do rotor seria aumentar o  $N_p$ .

Vale ressaltar que, ao comparar os valores nominais de rotação típicos de uma máquina de indução (3600, 1800 rpm), nota-se que a velocidade de 12 rpm é muito baixa. Conseqüentemente, o fato de o transformador rotativo possuir escovas para acesso aos enrolamentos do rotor não é crítico. Este resultado foi comprovado pelas manutenções realizadas no VFT de Langlois [25].

### **2.1.9 Relação entre Potência e Ângulo**

Assim como na grande maioria dos circuito de potência, o fluxo de potência ativa que atravessa o transformador rotativo é proporcional à diferença angular entre o estator e o rotor. A impedância do transformador rotativo e a rede determinam a magnitude do ângulo de fase requerido a uma dada transferência de potência. A potência reativa que atravessa o VFT é determinada pela impedância série do transformador rotativo e a diferença das magnitudes de tensão entre os dois lados do equipamento.

As equações apresentadas a seguir são baseadas em um transformador rotativo ideal sem representar a reatância de magnetização e a corrente de magnetização.

O fluxo de energia que atravessa o VFT pode ser aproximado por [8, 13]:

$$P_{VFT} = \frac{V_S V_R}{X_{SR}} \text{sen}(\theta_S - (\theta_R + \theta_{RM})), \text{ ou} \quad (2-44)$$

$$P_{VFT} = \frac{V_S V_R}{X_{SR}} \text{sen}\theta_{NET} \quad (2-45)$$

onde,

$P_{VFT}$  É a potência que flui pelo VFT, do estator para o rotor;

$V_S$  e  $V_R$  São as magnitudes das tensões nos terminais do estator e do rotor;

$X_{SR}$  É a reatância total entre os terminais do VFT;

$\theta_S$  É o ângulo de fase da tensão do estator em relação à referência;

$\theta_R$  É o ângulo de fase da tensão do rotor em relação à referência;

$\theta_{RM}$  É o ângulo de fase do rotor da máquina em relação ao estator.

Assim como em todos os sistemas de potência, há uma potência máxima teórica que atravessa o VFT em ambas as direções ( $P_{MAX}$ ), e sua magnitude é dado por:

$$P_{MAX} = \frac{V_S V_R}{X_{SR}} \quad (2-46)$$

o qual ocorre quando o ângulo da rede  $\theta_{NET}$  é igual a  $90^\circ$  em qualquer direção.

$$\theta_{NET} = (\theta_S - (\theta_R + \theta_{RM})) = \pm 90^\circ \quad (2-47)$$

Para operação estável, o ângulo  $\theta_{NET}$  deve ter um valor absoluto bem menor que  $90^\circ$ . A Figura 2.10 apresenta o diagrama fasorial do VFT, onde os ângulos de fase de (2-44) e (2-45) estão representados.

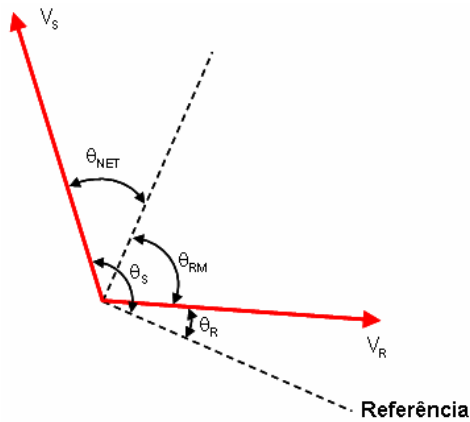


Figura 2.10 - Diagrama fasorial do VFT

## 2.2 Servos motores

Os servos motores são associações de máquinas elétricas e de conversores de eletrônica de potência e controlam com precisão a velocidade, torque e o posicionamento do seu eixo.

Para que seja possível a transferência de potência através do transformador rotativo, é necessário que haja defasagem angular entre os enrolamentos do estator e do rotor. Para isso é necessária a aplicação de torque externo no seu eixo. Para tanto, um servo motor é usado, com a finalidade de aplicar torque continuamente em qualquer das direções, proporcionando controle do ângulo de rotação e igualmente, na direção e na magnitude do fluxo de potência que atravessa o equipamento.

Conforme exposto na Seção 2.1.8, a velocidade de rotação do rotor do transformador rotativo é proporcional à diferença de frequências entre os sistemas a ele conectados. Quando dois sistemas possuem a mesma frequência nominal, o torque aplicado deverá ser feito para a condição de velocidade zero, ou seja, com o eixo parado.

Para o funcionamento do VFT, as condições apresentadas anteriormente devem ser atendidas, ou seja, o servo motor deve imprimir torque, que pode ser elevado, em baixa rotação ou em velocidade zero e deve ter um alto grau de confiabilidade para que se tenha um número reduzido de manutenções.

Os servos motores utilizados pela indústria siderúrgica apresentam características similares às citadas anteriormente, pois necessitam de elevado torque em baixas

rotações. Desta forma, as soluções empregadas por essa indústria, que serão expostas a seguir, tornam-se alternativas para utilização no VFT.

## **2.2.1 Acionamentos com máquinas de corrente contínua**

A máquina CC é um dos três tipos básicos de máquinas elétricas (existem ainda máquinas síncronas e de indução) e foi muito utilizada na indústria, principalmente quando se necessita de variação de velocidade, uma vez que ela é capaz de fornecer torque numa ampla faixa de velocidades. Esta máquina é uma alternativa para o VFT, já utilizada para aplicações com requisitos semelhantes (torque elevado em baixa rotação) como, por exemplo, nas usinas siderúrgicas. Nesta aplicação, as máquinas trabalham em regime muito severo, com altas temperaturas e de forma intermitente, aplicando elevado torque em regimes de rotação diferentes. Por esta razão, foi utilizada no projeto do VFT de Langlois [9].

### **2.2.1.1 Conversores adequados**

Nesta modalidade de acionamento é necessário que o conversor proporcione torque bidirecional e possua a capacidade de regeneração de energia. Isto porque no caso de interligações assíncronas, onde a diferença de frequências entre os sistemas faz com que o eixo do transformador rotativo gire, esta energia cinética gerada deve ser devolvida à rede.

Para estas especificidades, os conversores devem atuar nos quatro quadrantes. Vale ressaltar que a alimentação do conversor vem da rede, ou seja, em corrente alternada. Desta forma, um retificador com pontes em antiparalelo ou uma associação entre um conversor retificador e um *chooper* são alternativas viáveis para esta aplicação. O conversor retificador é usado quando a alimentação é feita em corrente alternada e *chooper* em corrente contínua. A Figura 2.11 resume o panorama de conversores aplicáveis deste ponto de vista.

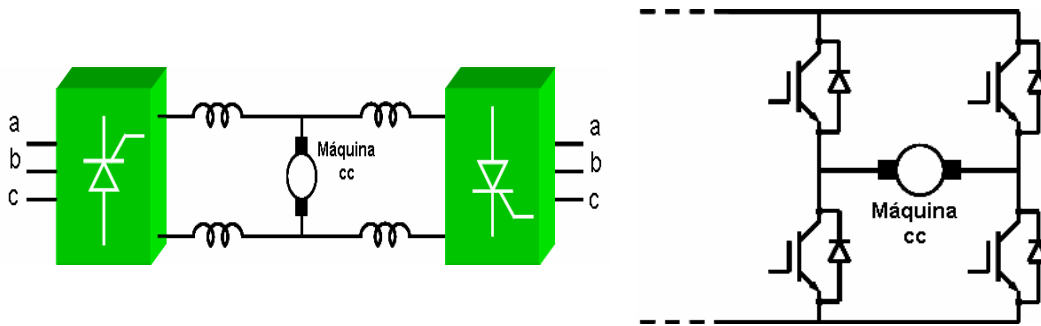


Figura 2.11 – Conversores estáticos aplicados a este panorama

Para o projeto de Langlois, foi escolhido o conversor retificador com pontes em antiparalelo. De acordo com a referência [9], esta é a melhor opção, pois apresentou bons resultados em aplicações industriais durante mais de duas décadas e por lidar com picos de alta sobrecarga, encontradas frequentemente na aplicação de máquinas de corrente contínua para a indústria siderúrgica.

## 2.2.2 Acionamentos com máquinas assíncronas

A máquina elétrica mais utilizada na prática, especialmente na indústria, é a máquina de indução, rotor gaiola de esquilo, sobretudo quando está operando como motor.

Apesar da dificuldade do seu controle, o seu largo emprego se justifica pela sua robustez (não existem partes que se desgastam facilmente, tais como comutador e escova), pelo seu baixo custo, pouca necessidade de manutenção e possibilidade de emprego na maioria das aplicações.

Para a abordagem requerida, onde se necessita de torque elevado em baixas rotações ou próximas de zero, há aplicações como, por exemplo, nas máquinas de laminação da indústria siderúrgica [34, 40 e 41]. Sua utilização para estas funções só é possível com auxílio de conversores, associado à técnica de controle vetorial.

### 2.2.2.1 Conversores adequados

As referências [39, 40, 41 e 42] indicam que para esta aplicação, que busca baixas velocidades e torques elevados, o conversor de malha intermediária com fonte de tensão (VSC) e o conversor matricial são as melhores soluções. Estes conversores são equipados com IGBTs ou IGCTs que, através de seu controle, permitem a variação da

freqüência de modo contínuo, proporcionando regulação do torque para uma larga faixa de velocidade.

No passado, os cicloconversores (conversores baseados em tiristores) foram utilizados para estes acionamentos, mas por problemas de baixo fator de potência e harmônicos atualmente, não são mais utilizados.

Ressalta-se que, para esta aplicação, o controle deve ser vetorial, pois no controle escalar não se garante controle dinâmico preciso.

A Figura 2.12 apresenta o esquema do conversor de malha intermediária com fonte de tensão (VSC).

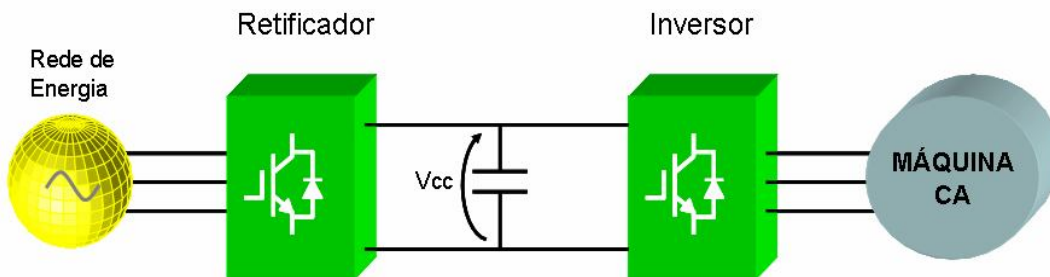


Figura 2.12 – Esquema do conversor de malha intermediária de tensão (VSC).

A Figura 2.13 apresenta o esquema do conversor matricial.

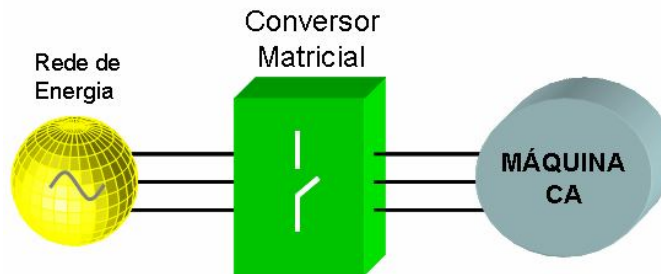


Figura 2.13 – Esquema de conversor matricial.

### 2.2.3 Acionamentos com máquinas síncronas

As máquinas síncronas são usadas na maioria dos casos como geradores, aplicações em que atingem potências muito elevadas. Em acionamentos industriais, o motor síncrono também é utilizado, por vezes, em aplicações de baixa velocidade e potência muito alta como, por exemplo, em laminadores, misturadores de borracha, trituradores e refinadores de polpa usados em indústria de papel [35].



Grande parte destas aplicações possui características semelhantes às requisitadas para o VFT, ou seja, torque elevado em baixas rotações. Desta forma, pode-se afirmar que esta máquina é mais uma alternativa para o funcionamento do VFT. Ressalta-se, que como a máquina indução, para trabalhar nesse regime, é necessária a presença de conversores com controle vetorial. Ou seja, os acionamentos utilizados para a máquina síncrona são idênticos aos utilizados para máquinas assíncronas, com a vantagem de essas máquinas serem mais eficientes que as máquinas assíncronas quando operando em baixa rotação (próximo de zero).

### **2.2.3.1 Conversores adequados**

A associação entre conversores com controle vetorial e a máquina síncrona resulta nas aplicações em sistemas, onde se buscam velocidades baixas e torques elevados. Para tanto, é fundamental o uso de conversores de malha intermediária com fonte de tensão (VSC) ou conversores matriciais.

Ou seja, reforçando o que foi exposto anteriormente, os conversores adequados para esta função são idênticos ao utilizado para máquinas assíncronas. As Figuras 2.12 e 2.13 expostas anteriormente representam as mesmas configurações de acionamentos utilizadas para máquina síncrona.

## **2.3 Estratégia de Controle do Fluxo de Potência**

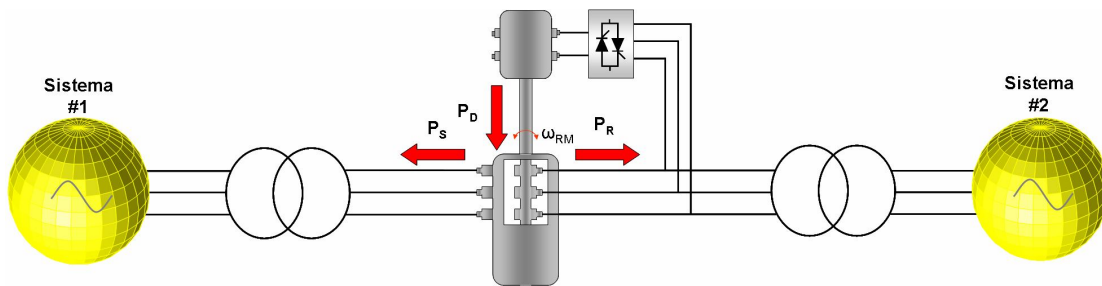
O objetivo principal do controle é manter ou mudar o referencial de potência através de um sinal de controle. Os sistemas de potência são sujeitos a vários distúrbios, que resultam em desvios de frequência e tensão. O sistema de controle do VFT deve constantemente manter a posição relativa do rotor com relação ao estator de forma a compensar todas as variações de frequência através das duas redes síncronas ou assíncronas. Isto, por sua vez, assegura transferência de potência controlada.

O torque eletromagnético produzido pelo servo motor deve ser igual ao torque gerado pelo VFT. Isto acontece devido ao uso da máquina de indução duplamente alimentada (transformador rotativo) como interligadora dos sistemas. Sua utilização por si só não é suficiente e não garante a operação com potência controlada na interligação. Caso nenhum torque seja aplicado ao rotor (rotor livre), o comportamento natural será

de alinhar seu campo ao campo do estator, o que se repete mesmo que os ângulos das tensões nos terminais do equipamento estejam defasados.

Em síntese, para que o fluxo de potência na interligação seja diferente de zero, é necessária a aplicação de torque externo no eixo do transformador rotativo. A estratégia de controle é baseada neste conceito. Na prática, é proporcionado por um servo motor (motor mais acionamento eletrônico) para controle e aplicação do torque.

A Figura 2.15 apresenta um diagrama do VFT. As grandezas  $P_S$ ,  $P_R$  e  $P_D$  representam, respectivamente, as potências elétricas no estator, no rotor e a potência mecânica transferida ao eixo do transformador rotativo pelo servo motor.



**Figura 2.14 – Diagrama representativo do VFT**

O sentido dos fluxos indicados na Figura 2.14 baseia-se na convenção de gerador, com sinal positivo para potência saindo dos enrolamentos do rotor e estator e entrando no eixo da máquina através do servo motor. O sentido real dos fluxos pode ser positivo ou negativo, dependendo das condições operativas do VFT.

Do balanço de energia no VFT obtém-se a seguinte expressão [8, 12]:

$$P_S = P_D - P_R. \quad (2-48)$$

O VFT pode ser entendido como um transformador. Considerando que os enrolamentos do rotor e estator enlaçam o mesmo fluxo magnético, pode-se escrever:

$$N_S I_S = -N_R I_R. \quad (2-49)$$

onde,

$N_S$  é o número de espiras do enrolamento do estator;

$N_R$  é o número de espiras do enrolamento do rotor;

$I_S$  é a corrente que sai do enrolamento do estator;

$I_R$  é a corrente que sai do enrolamento do estator.

Embora os fluxos enlaçados pelos enrolamentos sejam iguais, no VFT as frequências nos enrolamentos do estator e do rotor podem ser diferentes. Desta forma, as tensões nos enrolamentos podem ser escritas da seguinte forma [8, 12]:

$$V_S = N_S f_S \psi_A, \quad (2-50)$$

$$V_R = N_R f_R \psi_A \text{ ou} \quad (2-51)$$

e

$$\frac{V_R}{N_R} = \frac{V_S f_R}{N_S f_S}. \quad (2-52)$$

onde,

$V_S$  é a tensão nos terminais do estator;

$V_R$  é a tensão nos terminais do rotor;

$f_S$  é a frequência estator;

$f_R$  é a frequência rotor;

$\psi_A$  é o fluxo no entreferro do VFT.

Combinando (2-44) e (2-52), pode-se escrever [8, 12]:

$$P_D = P_S + P_R, \quad (2-53)$$

$$P_D = V_S I_S + V_R I_R, \quad (2-54)$$

$$P_D = V_S I_S + \left( \frac{N_R V_S f_R}{N_S f_S} \right) \left( - \frac{N_S I_S}{N_R} \right), \quad (2-55)$$

$$P_D = V_S I_S - V_S I_S \frac{f_R}{f_S} = V_S I_S \left( 1 - \frac{f_R}{f_S} \right) \quad (2-56)$$

e

$$P_D = P_S (1 - s). \quad (2-57)$$

O torque produzido pelo servo motor  $T_D$  é:

$$T_D \omega_{RM} = P_D, \quad (2-58)$$

$$T_D = \frac{V_S I_S \left( 1 - \frac{f_R}{f_S} \right)}{f_S - f_R}, \quad (2-59)$$

$$T_D = \frac{V_S I_S \frac{(f_S - f_R)}{f_S}}{f_S - f_R}, \quad (2-60)$$

$$T_D = \frac{V_S I_S}{f_S}, \quad (2-61)$$

$$T_D = \frac{(N_S f_S \psi_A I_S)}{f_S} \quad (2-62)$$

e

$$T_D = N_S I_S \psi_A \quad (2-63)$$

Deve-se observar (2-63) que o torque  $T_D$  independe da velocidade de rotação do rotor do VFT; e é proporcional à corrente do estator e ao fluxo no entreferro.

Tendo em vista que o VFT opera com fluxo aproximadamente constante, o torque  $T_D$  basicamente varia só em função da corrente do estator. Desta forma, pode-se dizer que a potência que flui pelo VFT é proporcional ao torque  $T_D$  aplicado. Neste sentido, a forma mais natural para controle do fluxo de potência ativa no VFT é através do controle do torque aplicado ao eixo desta máquina.

O controle de torque utilizado pelo VFT instalado em Langlois, é feito por uma máquina de corrente contínua acoplada ao eixo do transformador defasador. Para tanto, qualquer servo motor com controle de torque poderia ser utilizado, desde que possua a capacidade de imprimir torque, mesmo com o rotor parado em ambas as direções. A Figura 2.15 apresenta um diagrama de blocos do sistema de controle de potência.

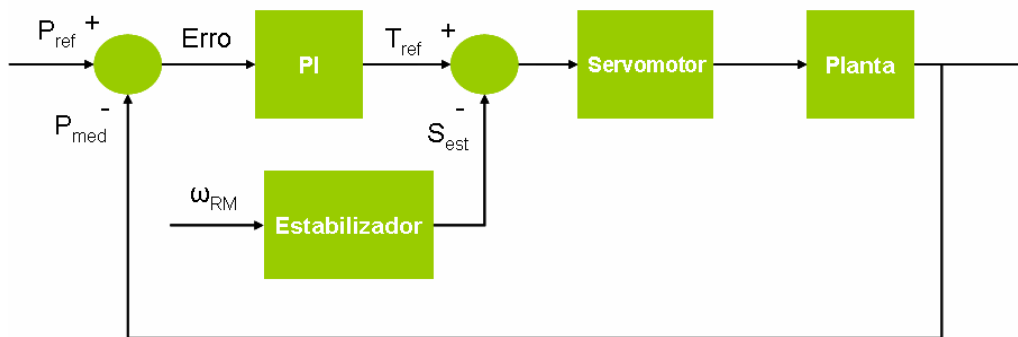


Figura 2.15 – Diagrama de blocos do sistema de controle

O regulador de potência de malha fechada (controlador PI) compara a potência medida ( $P_{med}$ ) com a referência ( $P_{ref}$ ) e regula o torque do motor em função do erro de potência. O regulador não é suficiente para responder os distúrbios da rede e manter a

transferência de potência de forma estável. Para tanto, um bloco estabilizador é inserido de forma a assegurar o comportamento apropriado para a operação normal do sistema e introduzir robustez suficiente durante os eventos ocorridos.

## **2.4 Comentários finais**

Este Capítulo apresentou as principais partes que compõem o VFT, tendo como foco o transformador rotativo, máquina de indução duplamente alimentada com os terminais do rotor e estator acessíveis. Sendo este equipamento o cerne do VFT, sua modelagem dinâmica e para regime permanente foram abordadas assim como as equações que determinam a velocidade rotor. A relação entre potência e ângulo e as possíveis alternativas de interligação de sistemas elétricos utilizando o Transformador Rotativo.

Para os servos motores, abordou-se sobre sua importância no controle contínuo do torque, pois está acoplado ao eixo do transformador rotativo e desta forma atua no sentido de aumentar ou diminuir a defasagem angular entre os terminais do VFT. Ou seja, sem este equipamento não é possível o controle contínuo do fluxo de potência que atravessa o VFT. Superficialmente, também foi abordado sobre o servo motor utilizado hoje no VFT instalado em Langlois e as possíveis alternativas para sua substituição.

Por fim, para o controle, apresentou-se o tipo de regulador utilizado e sua função.

No próximo Capítulo serão realizadas as simulações do VFT em regime permanente, no intuito de apresentar seu desempenho para variações da potência de curto-circuito nos sistemas conectados aos barramentos do VFT e a influência da compensação de reativos no fluxo de potência que atravessa o equipamento.

# CAPÍTULO 3

## DESEMPENHO DO VFT EM REGIME PERMANENTE

Este Capítulo apresenta o modelo e os resultados das simulações para ilustração do desempenho em regime permanente de um VFT típico aplicado na conexão de sistemas elétricos. O modelo e as simulações foram realizados no ANAREDE [43], considerando os parâmetros do equipamento instalado em Langlois [2, 5 e 15].

### 3.1 Modelo para o VFT desenvolvido no ANAREDE para regime permanente

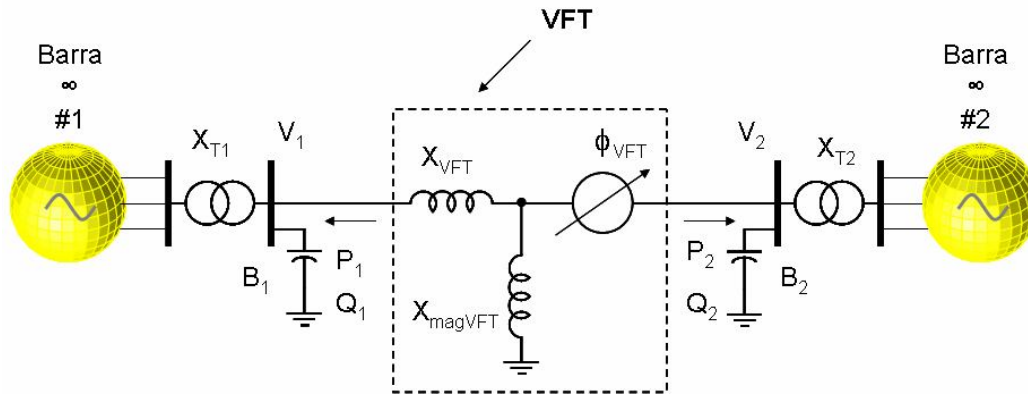
A Figura 3.1 apresenta o modelo proposto em [2] e [15] para a modelagem do VFT em regime permanente.

O VFT foi modelado no ANAREDE, software desenvolvido pelo CEPEL para análise de fluxo de potência, e considera os parâmetros do equipamento instalado em Langlois. Ele foi representado como um transformador defasador e uma reatância em derivação. A Tabela 1 sumariza os parâmetros utilizados nas simulações deste Capítulo.

**Tabela 1: Parâmetros do VFT para regime permanente [15]**

Parâmetros	Valores
$X_{VFT}$	0,12 pu
$X_{magVFT}$	5,6 pu
$X_{T1}$ e $X_{T2}$	0,10 pu

Como o elemento central do VFT é o transformador rotativo (máquina de indução duplamente alimentada), a reatância em paralelo foi inserida com a finalidade de representar sua elevada reatância de magnetização (5,6 pu na base da máquina), que dá origem a uma corrente de magnetização de 0,18 pu ou 18%, a qual impõe uma elevada absorção de potência reativa da rede. Os capacitores em derivação são inseridos com a finalidade de compensar a elevada potência reativa.



**Figura 3.1 – Modelo para análise de fluxo de potência**

O sentido dos fluxos indicados na Figura 3.1 é utilizado como base para todas as simulações desenvolvidas neste capítulo e tem como parâmetro a convenção de gerador com sinal positivo para potência saindo dos enrolamentos do VFT. O sentido real dos fluxos pode ser positivo ou negativo, dependendo das condições operativas do VFT.

Assim como em qualquer outro circuito de potência, o fluxo de potência ativa que atravessa o transformador rotativo é proporcional ao seno do ângulo entre o estator e o rotor. A impedância do transformador rotativo e a rede determinam a magnitude do ângulo de fase requerido para uma dada transferência de potência. A potência reativa que atravessa o VFT é determinada pela impedância série do transformador rotativo e a diferença das magnitudes de tensão entre os dois lados do equipamento, conforme mencionado no Capítulo 2.

Vale ressaltar que o VFT pode ajustar o ângulo entre o enrolamento do estator e do rotor dentro da faixa de  $90^\circ$ . Além disso, as reatâncias do sistema e o nível de compensação de potência reativa determinam o fluxo de potência que atravessa o equipamento.

### **3.2 Simulações em regime permanente para fluxo variando de 0 a 100% (sem compensação reativa)**

Nesta Seção, pretende-se analisar a atuação do controle de tensão nos barramentos do VFT e sua influência sobre o fluxo de potência que atravessa o equipamento. A seguir, são apresentadas diferentes configurações, onde, inicialmente, os terminais do VFT serão conectados a barras infinitas. Posteriormente, as conexões serão feitas

através de transformadores, nos quais as tensões nos barramentos do equipamento irão variar em função da magnitude do fluxo de potência.

Os resultados apresentados nesta Seção têm como base os parâmetros do VFT instalado em Langlois e a base de potência do sistema utilizada para os cálculos é de 100 MVA.

### 3.2.1 Tensão controlada nos terminais VFT

Neste panorama (Figura 3.2), admite-se que os terminais do VFT estão conectados a sistemas com potência de curto circuito muito elevadas, ou seja, barras infinitas. Desta forma, as tensões nos terminais da máquina (VFT) são fixas e o fluxo de potência que atravessa o equipamento estará relacionado com a defasagem angular entre as tensões do estator e do rotor e a reatância do VFT.

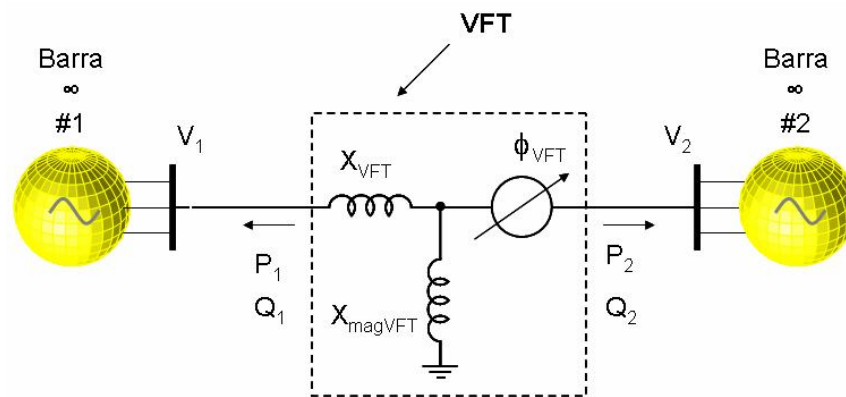


Figura 3.2 – VFT entre duas barras infinitas

A Figura 3.3 apresenta a potência ativa que atravessa o VFT para diferentes valores de defasagem angular, considerando três valores de reatância para o VFT. Observa-se que o fluxo de potência que atravessa o VFT é proporcional ao seno do ângulo e inversamente proporcional à impedância. Isto é, quanto maior a defasagem angular e menor a reatância, maior será o fluxo que atravessa o equipamento.



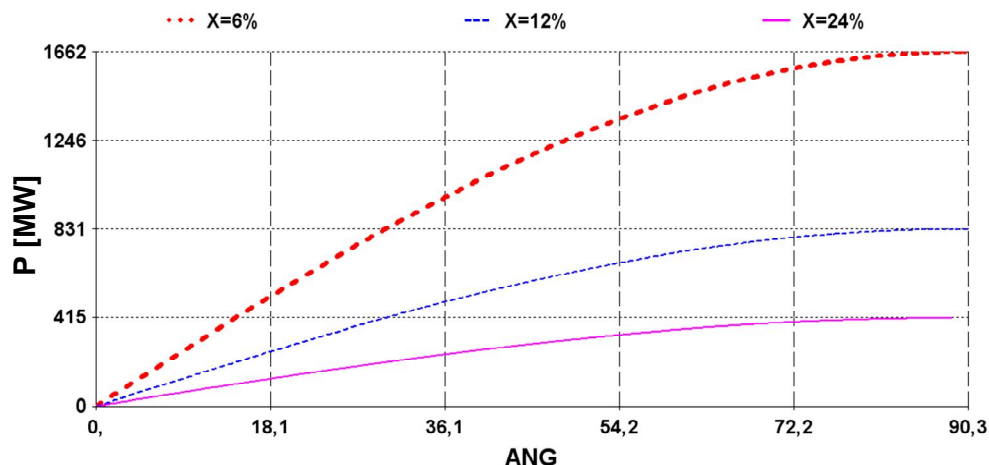


Figura 3.3 – Potência em função do ângulo.

### 3.2.2 Sem controle de tensão nos terminais do VFT

Neste cenário (Figura 3.4), dois transformadores são conectados aos terminais do VFT, ou seja, as barras infinitas estão conectadas a esses dois novos equipamentos. Desta forma, as tensões nos terminais da máquina (VFT) não são mais fixas, variando de acordo magnitude do fluxo de potência que atravessa o equipamento.

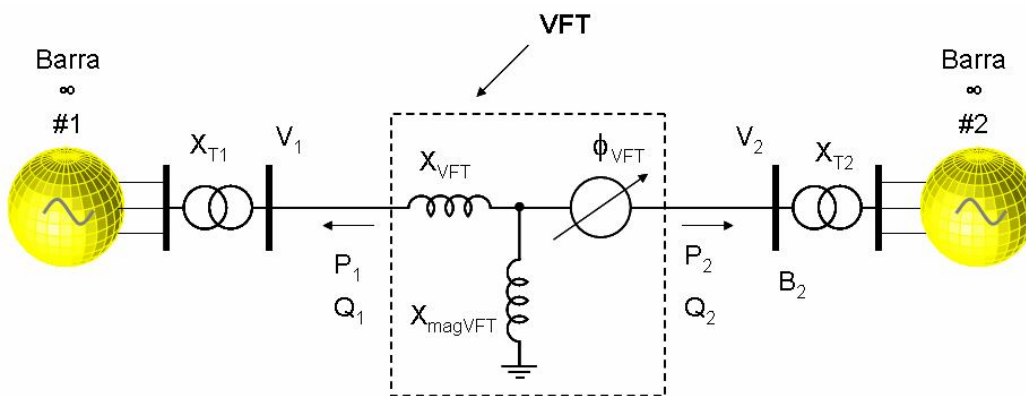


Figura 3.4 – VFT entre dois transformadores e as barras infinitas

A Figura 3.5 mostra a diferença entre os cenários apresentados nas Figuras 3.2 e 3.4, na qual observa-se que, ao controlar a tensão nos terminais da máquina de indução (VFT), o fluxo de potência que atravessa o equipamento será maior. Já a Figura 3.6 mostra o decaimento da tensão em um dos terminais do VFT em função do fluxo de potência que atravessa o equipamento.

Nota-se que o valor máximo de potência que flui pelo VFT é fortemente influenciado pela tensão em suas barras terminais. Para as condições apresentadas na Figura 3.4, a potência máxima é reduzida em aproximadamente 30% quando se considera o efeito da redução de tensão nas barras terminais do VFT.

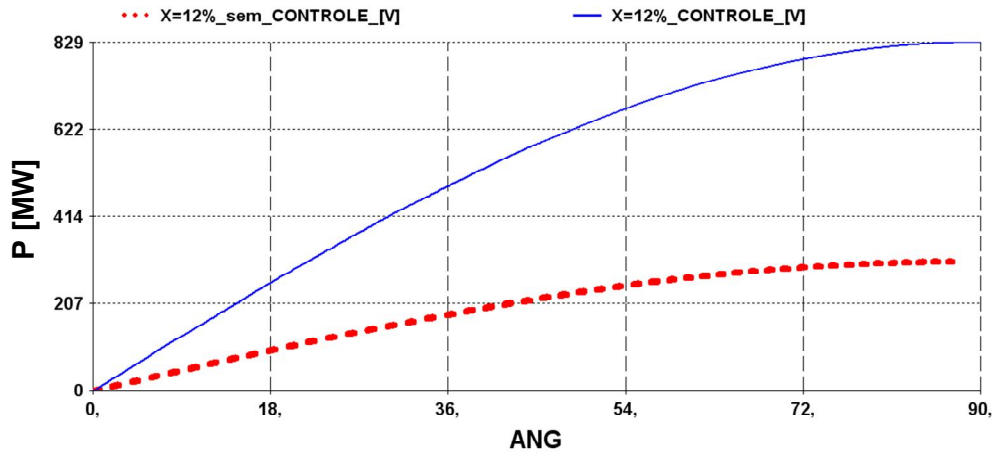


Figura 3.5 – Gráfico das curvas de ângulo de potência

A Figura 3.6 apresenta o efeito do aumento do fluxo de potência no perfil de tensão do VFT. Observa-se que a tensão atinge 76% para o valor máximo de potência, considerando a configuração da Figura 3.4.

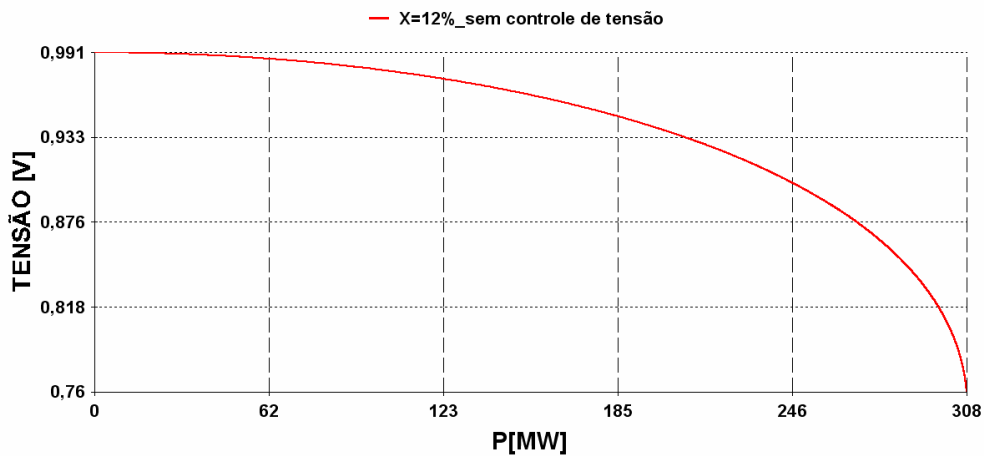


Figura 3.6 – Gráfico da curva P X V

### 3.3 Efeitos da variação do nível de curto-circuito

Este item apresenta a influência do nível de curto-circuito na transferência de potência pelo VFT. A potência de curto-circuito de uma barra mostra o quanto ela é forte ou fraca, ou seja, o quanto ela se aproxima ou se afasta de ser uma barra infinita. A Figura 3.7 mostra três cenários, nos quais o VFT possui a mesma impedância e conecta sistemas de níveis de curto-circuito diferentes. No primeiro, a potência de curto é de 1000MVA; no segundo, de 500MVA; e no terceiro, de barras infinitas.

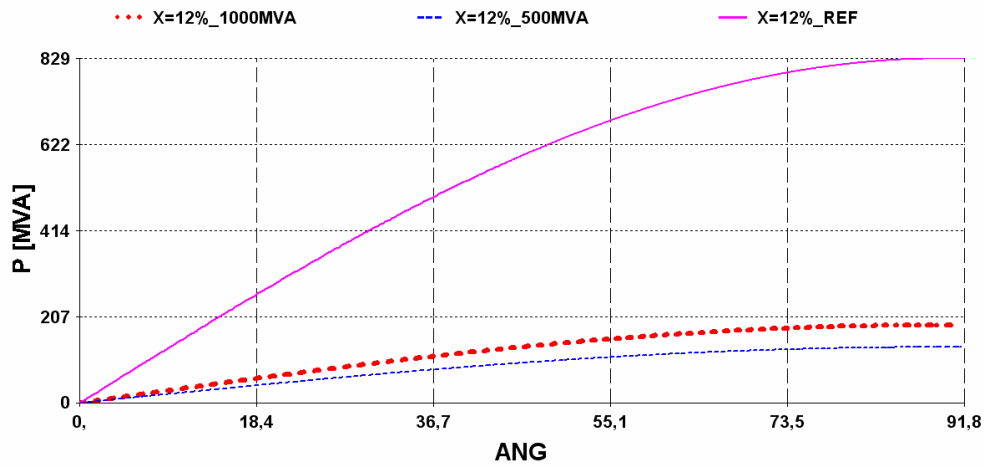


Figura 3.7 – Gráfico das curvas de ângulo de potência

Analisando a Figura 3.7, nota-se a influência da potência de curto-circuito na transferência de potência entre as interligações. Quanto menor ela for, maior será a dificuldade do VFT de transferir potência entre os sistemas.

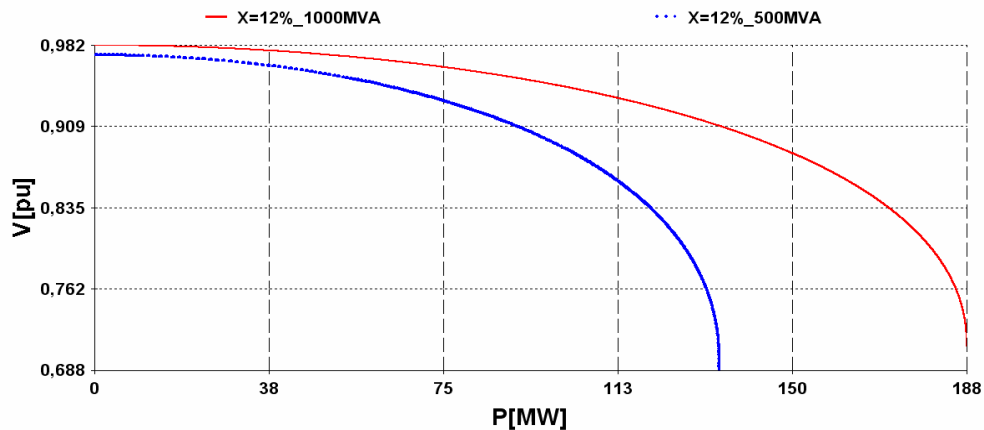


Figura 3.8 – Gráfico das curvas PX V

A Figura 3.8 apresenta o efeito da redução da tensão em um dos terminais do VFT em função do fluxo de potência que atravessa o equipamento. Percebe-se que quanto mais forte for o sistema (maior potência de curto-circuito), melhor será o perfil de tensão nos terminais do equipamento. A Figura 3.9 ilustra a redução da potência reativa com o aumento da potência ativa que atravessa o VFT. Ao analisar as Figuras 3.8 e 3.9, observa-se que há relação entre a potência reativa e a tensão, a qual mostra que quando há queda no módulo da potência reativa também há redução no perfil de tensão.

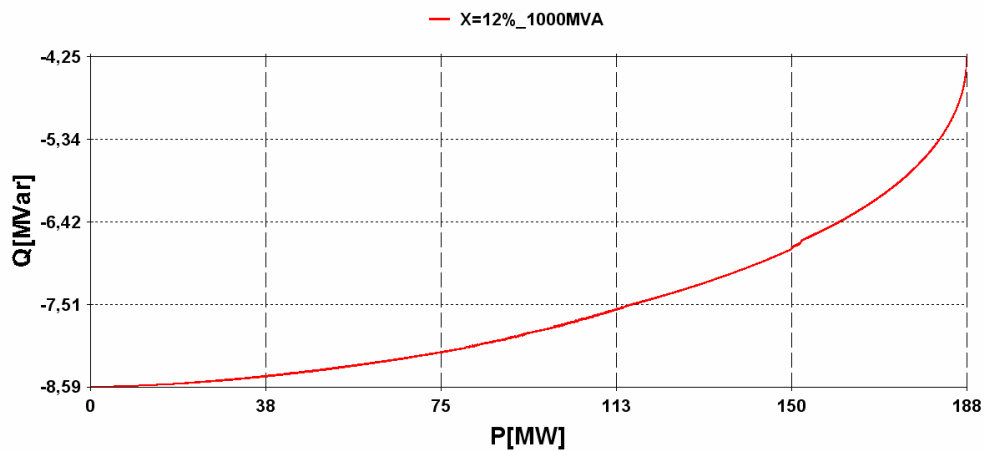


Figura 3.9 – Gráfico da curva P X Q

### 3.4 Efeitos da conexão da compensação shunt

Esta simulação apresenta o efeito da conexão de bancos capacitivos, em derivação, no fluxo de potência que atravessa o VFT. A Figura 3.1 mostra uma configuração, na qual os bancos de 25 MVA em derivação são conectados aos terminais do VFT. Nesta configuração o equipamento (VFT) se conecta por meio de dois transformadores elevadores em sistemas com nível de curto-circuito de 1000 MVA.

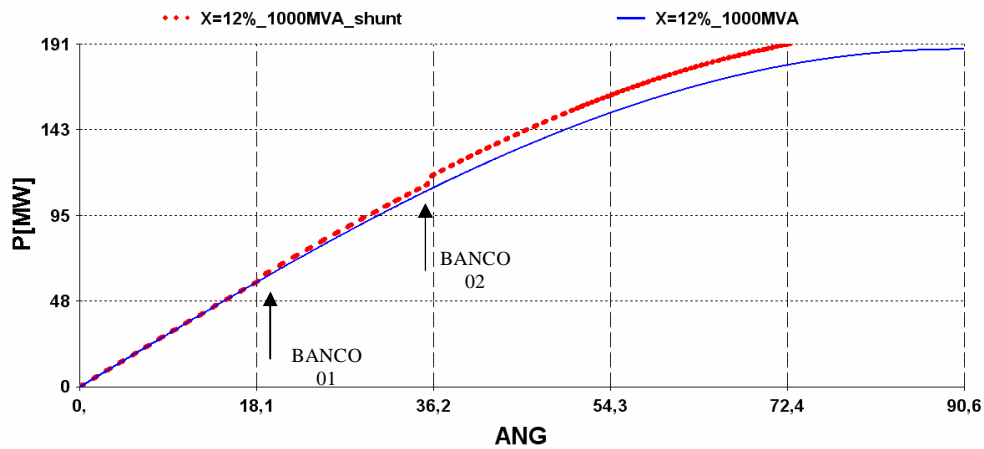


Figura 3.10 – Gráfico das curvas de ângulo de potência

A Figura 3.10 ilustra o comportamento do fluxo de potência em dois cenários, com e sem os bancos *shunts*. Observa-se que, após a inserção dos dois bancos *shunts* para o mesmo ângulo, a quantidade de fluxo de potência que atravessa o equipamento é maior. Ou seja, controlando a tensão nas barras terminais do VFT, por meio da inserção de potência reativa injetada pelos bancos *shunts*, obtém-se um melhor desempenho do equipamento.

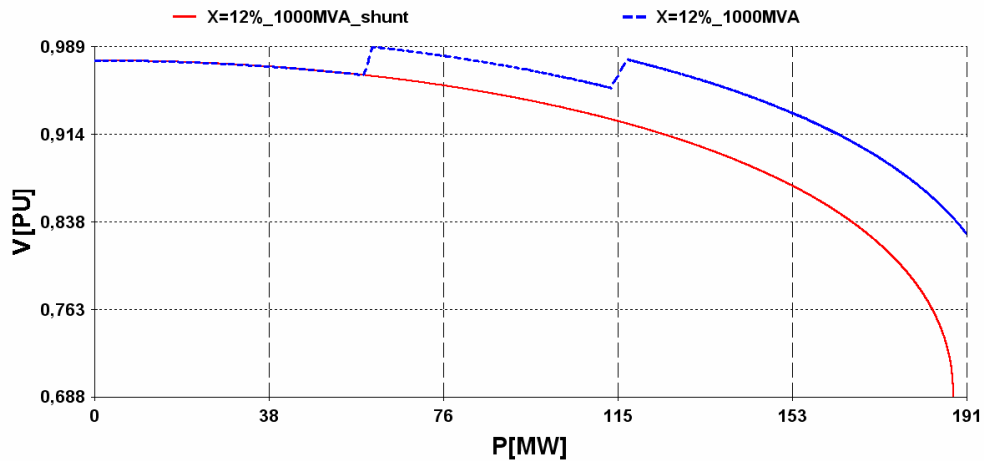


Figura 3.11 – Gráfico das curvas de potência X tensão.

A Figura 3.11 representa o mesmo cenário, mostrando a influência dos bancos *shunt* no perfil de tensão nos terminais do VFT.

### **3.5 Comentários finais**

Este Capítulo apresentou o modelo do VFT para regime permanente, assim como as simulações no ANAREDE [43] para diferentes configurações. Dado o que foi apresentado, observa-se a importância da potência de curto-circuito dos sistemas na defasagem angular imposta pelo VFT, pois quanto menor ela for maior será a dificuldade do VFT de transferir energia entre os sistemas.

O controle de tensão nos barramentos do VFT é outro fator importante observado, explicito na Seção 3.4. Nota-se que, no instante de inserção dos bancos de capacitores, houve uma maior transferência de energia para um mesmo ângulo.

No próximo Capítulo será abordada a modelagem dinâmica do VFT. Serão apresentadas simulações em diferentes configurações mostrando assim seu desempenho dinâmico na conexão de sistemas elétricos.

# CAPÍTULO 4

## DESEMPENHO DO VFT EM REGIME DINÂMICO

Este Capítulo apresenta o modelo e os resultados das simulações para ilustração do desempenho dinâmico de um VFT típico aplicado na conexão de sistemas elétricos. O modelo e as simulações foram realizados no ANATEM [44], considerando os parâmetros do equipamento instalado em Langlois [2, 5, 15], com o sistema de controle desenvolvido neste trabalho.

### 4.1 Modelo para Regime Dinâmico

A Figura 4.1 apresenta o modelo proposto em [15] para a representação do VFT em simulações dinâmicas. Assim como o caso do regime permanente, o modelo está baseado na utilização de um transformador defasador e considera a dinâmica da máquina através da equação de oscilação eletromecânica.

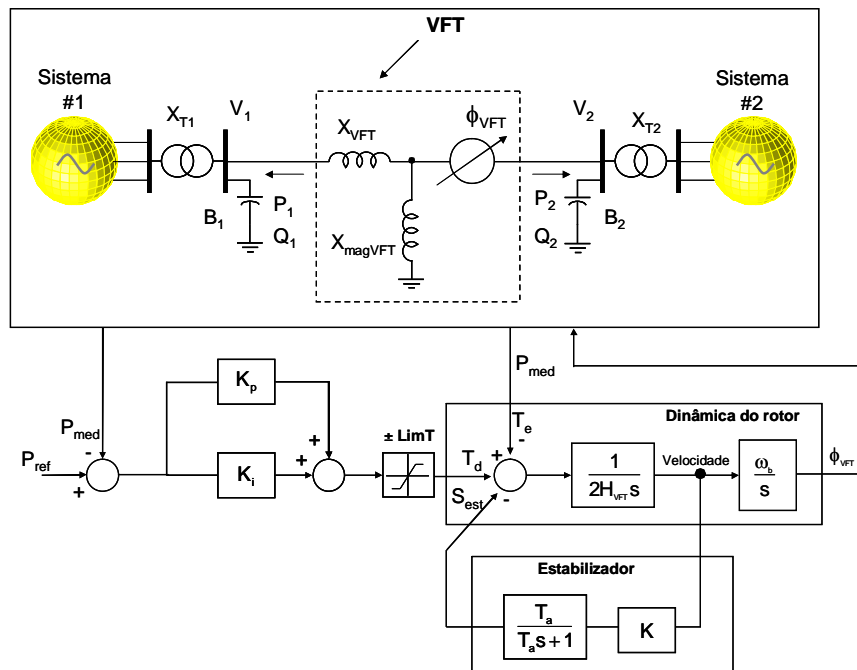


Figura 4.1 – Modelo para simulações dinâmicas do VFT.

Nesta ilustração (Figura 4.1),  $P_{ref}$  e  $P_{med}$  são, respectivamente, a potência de referência para o controle e a potência medida que atravessa o equipamento. Para melhor visualização, nas Figuras 4.2 e 4.3 esta potência é medida entre os terminais do VFT. Ou seja, entre as barras 3 e 5.

Como comentado anteriormente o modelo foi desenvolvido no ANATEM [44], software desenvolvido pelo CEPEL para análise de transitórios eletromecânicos e considera os parâmetros do equipamento instalado em Langlois, indicados na Tabela 2. A constante de inércia de 26,2 s é relativamente elevada, não permitindo uma variação rápida do fluxo de energia para os diversos eventos que ocorrerão no sistema. Como exposto no Capítulo 3, a reatância de magnetização do VFT (5,6 na base da máquina) dá origem a uma corrente de magnetização de 18%, o que impõe uma elevada absorção de potência reativa da rede.

**Tabela 2 : Parâmetros do VFT para regime dinâmico [15]**

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
$X_{VFT}$	0,12 pu
$X_{magVFT}$	5,6 pu
$X_{T1}$ e $X_{T2}$	0,10 pu
H - Constante de inércia do VFT	26,2s

Ressalta-se que o modelo apresentado será validado com o modelo das referências [5] e [15], pois o controle apresentado na Figura 4.1, e explicado na Seção 4.2, é próprio desta dissertação, dado que nas citadas referências o controle não é exposto, aparecendo apenas como uma caixa preta. Para tanto, serão comparados os resultados para variação em degrau da potência.

## 4.2 Sistema de Controle

Conforme apresentado na Seção 2.1.9, o fluxo de potência pelo VFT é proporcional ao seno do ângulo imposto ao transformador rotativo assim como das tensões terminais e da reatância equivalente. A impedância do VFT e dos sistemas conectados determinam a magnitude da defasagem angular, necessária para a transferência de um determinado valor de potência ativa. Já o regulador de potência, baseado em um controlador PI, mede a potência ativa no VFT e gera um sinal de torque a ser aplicado pelo sistema de acionamento, de forma que a potência siga a referência estabelecida.



Ressalta-se que o sinal de torque na saída do controlador PI é limitado para que na ocorrência de eventos severos o torque aplicado não alcance valores irreais e, desta forma, ocasionar danos ao sistema de acionamento. Este controlador PI, na ocorrência dos diferentes distúrbios ocorridos na rede, não é capaz de manter o fluxo de energia de forma estável. Para tanto, é inserido um bloco estabilizador.

De forma geral, o estabilizador possui os seguintes elementos: um filtro passa-alta (*washout*); e um amplificador (ganho). O bloco *washout* funciona como um filtro passa-alta, sua constante de tempo  $T_a$  deve ser grande o suficiente para permitir que sinais com oscilações passem sem variações. Ou seja, permitir que o estabilizador responda apenas às variações de velocidade. O ganho do estabilizador determina apenas a magnitude do amortecimento introduzido.

A atuação deste estabilizador resulta na recuperação da capacidade de transmissão do sistema, melhorando a estabilidade do mesmo, uma vez que as oscilações do sistema limitam a capacidade de transmissão dos sistemas de potência.

### **4.3 Desempenho Dinâmico do VFT considerando o Modelo Desenvolvido no ANATEM**

Na Seção 2.1.7 apresentou-se as alternativas de interligação de sistemas elétricos utilizando o VFT. As simulações foram feitas tendo essas opções como base, nas quais o VFT será aplicado na conexão de sistemas elétricos síncronos ou assíncronos.

As Figuras 4.2 e 4.3 ilustram tais configurações, que serão utilizadas na análise do desempenho do VFT quando o mesmo é empregado na interligação de dois sistemas síncronos de frequências nominais iguais a 60 Hz. Em ambas as figuras, a representação do VFT encontra-se entre as barras 3 e 5, sendo  $P_{med}$  a potência medida que atravessa estas barras e  $P_{int}$  a potência que atravessa o circuito que liga as barras 2 e 6 representado na Figura 4.2.

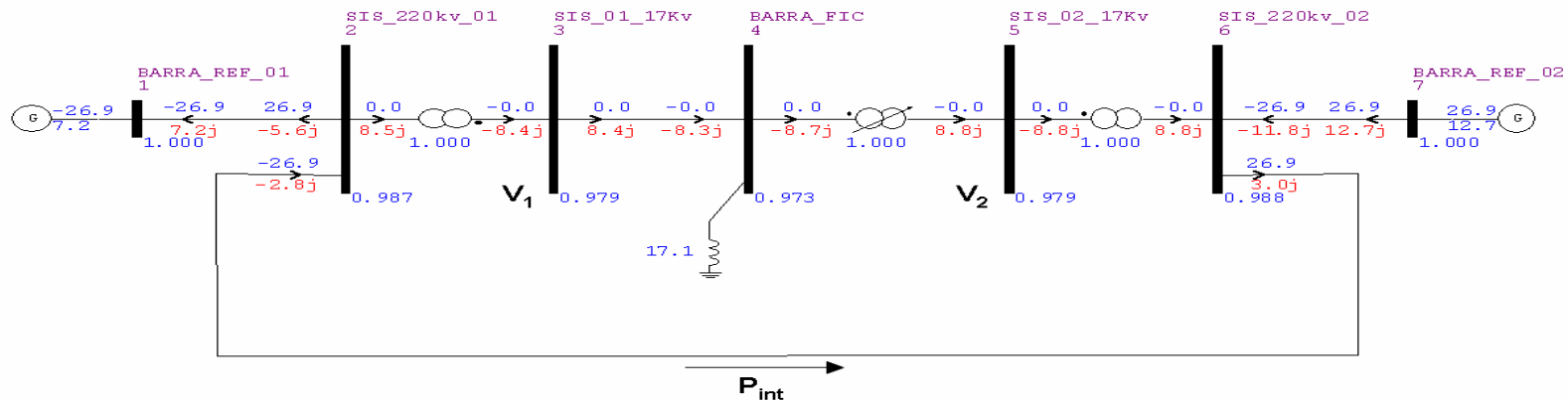


Figura 4.2 – Diagrama unifilar do sistema desenvolvido para as simulações dinâmicas em uma interligação síncrona.

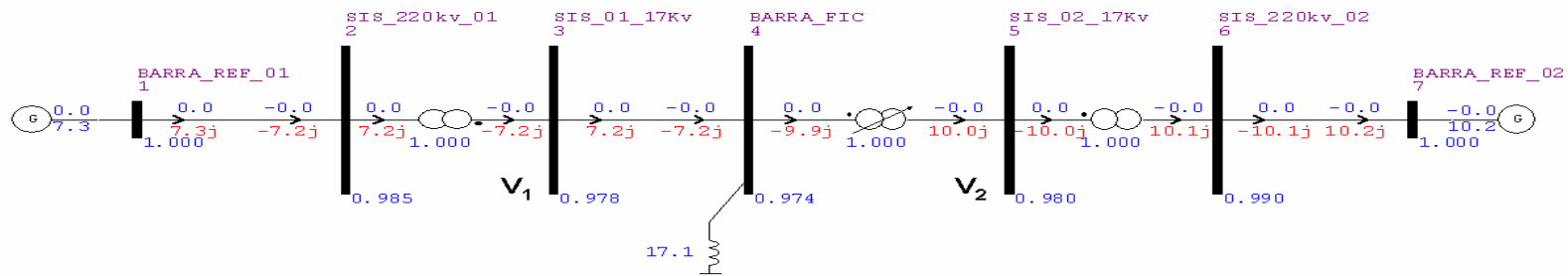


Figura 4.3 – Diagrama unifilar do sistema desenvolvido para as simulações dinâmicas em uma interligação assíncrona.

Nestas configurações, os sistemas equivalentes conectados aos transformadores possuem potências de curto-circuito de 500 MVA (sistema 1) e 1000 MVA (sistema 2), sendo estas ajustadas através de impedâncias externas. É importante notar que os dois sistemas estão representados por duas fontes de tensão, com frequência e tensão fixas.

Os sistemas apresentados nas Figuras 4.2 e 4.3 são usados para investigar o desempenho do VFT implementado no ANATEM [44] para respostas a degraus de referência de potência, curto-circuito trifásico e inserção dos bancos de capacitores. Destaca-se que, devido às limitações do simulador, uma vez que o ANATEM não representa a seqüência zero, todos os eventos são de seqüência positiva.

Nas próximas seções são apresentados os resultados de transitórios eletromecânicos, que ilustram o desempenho do VFT para as diferentes condições operativas comentadas no parágrafo acima. Na Figura 4.3, optou-se por representar o sistema indicado nas referências [5] e [15] para fins de comparação com os resultados disponíveis.

### 4.3.1 Resposta Dinâmica do VFT em Conexões Síncronas

Nesta Seção considera-se a conexão do VFT com dois sistemas elétricos síncronos, ou seja, já interligados por um circuito de corrente alternada, como exposto na Figura 4.2. Os parâmetros utilizados no controle para esta configuração encontram-se indicados na Tabela 4.

**Tabela 3 : Parâmetros do controle em conexões síncronas**

Parâmetros	Unidades	Valores
$K_p$	pu	2,5
$K_i$	pu	2,8
$K$	pu	900
LimT	pu	4,0
$T_a$	segundos	10
$H_{VFT}$	segundos	26,2
$\omega_b$	Rad/s	376,99

#### 4.3.1.1 Caso 1: Mudança de referência de potência, com frequência constante e sem manobra de banco de capacitores

Os itens a seguir apresentam os principais aspectos considerados na simulação do Caso 1 de conexão síncrona:

- ✓ A simulação é realizada em uma janela de tempo de 11 segundos;
- ✓ As frequências dos sistemas equivalentes não variam no tempo;
- ✓ A simulação considera variação na potência de referência de zero para 100 MW ( $t=1s$ ), de 100 MW para -100 MW ( $t=3s$ ) e de -100 MW para 0 MW ( $t=6s$ );
- ✓ Não foram realizadas manobras em bancos de capacitores;
- ✓ Os ângulos das fontes foram ajustados para que o intercâmbio na interligação fosse inicialmente de 27 MW (do sistema 2 para o sistema 1).

A Figura 4.4 apresenta o sinal de referência de potência para o VFT e a potência medida no equipamento.

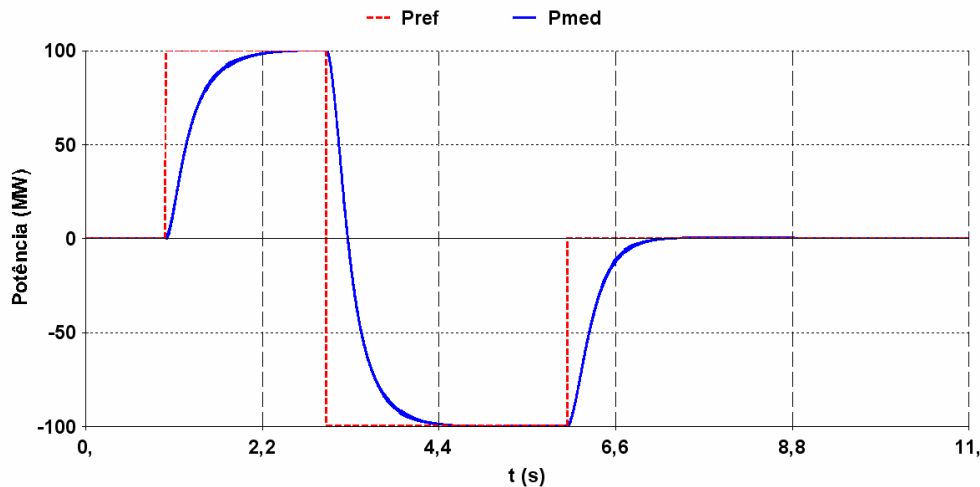
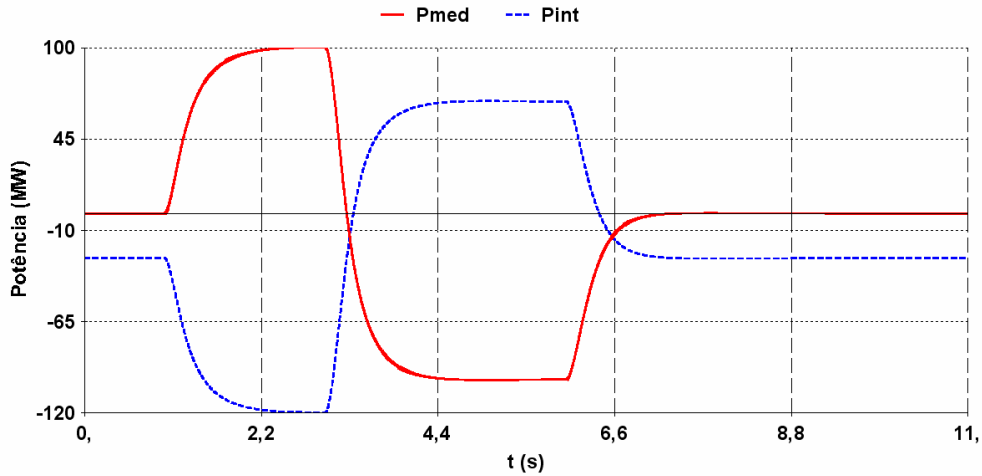


Figura 4.4 – Potência de referência e medida no VFT.

A Figura 4.4, mostra que o modelo desenvolvido no ANATEM para o VFT apresenta desempenho dinâmico adequado para as variações de potência em degrau: nota-se que o fluxo medido segue as referências de potências com amortecimento satisfatório. Também se observa que o tempo de resposta para as variações em degrau da potência é de aproximadamente 1,5 segundos. Isto se dá devido ao fato da elevada inércia do eixo do VFT.

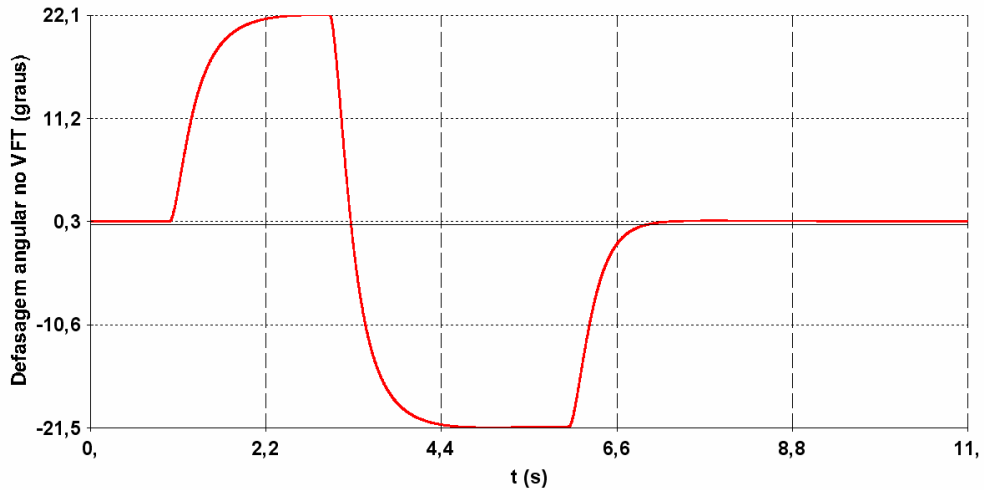
A Figura 4.5 apresenta os fluxos de potência ativa que atravessa o VFT ( $P_{med}$ ) e na interligação em corrente alternada ( $P_{int}$ ). Observa-se que inicialmente, o fluxo na interligação era de 27 MW, do sistema 2 para o sistema 1 (valor negativo na figura). Com o ajuste do intercâmbio para 100MW, alteram-se os ângulos, o que leva à modificação no fluxo da interligação em corrente alternada (120 MW).



**Figura 4.5 – Potência ativa na interligação e no VFT**

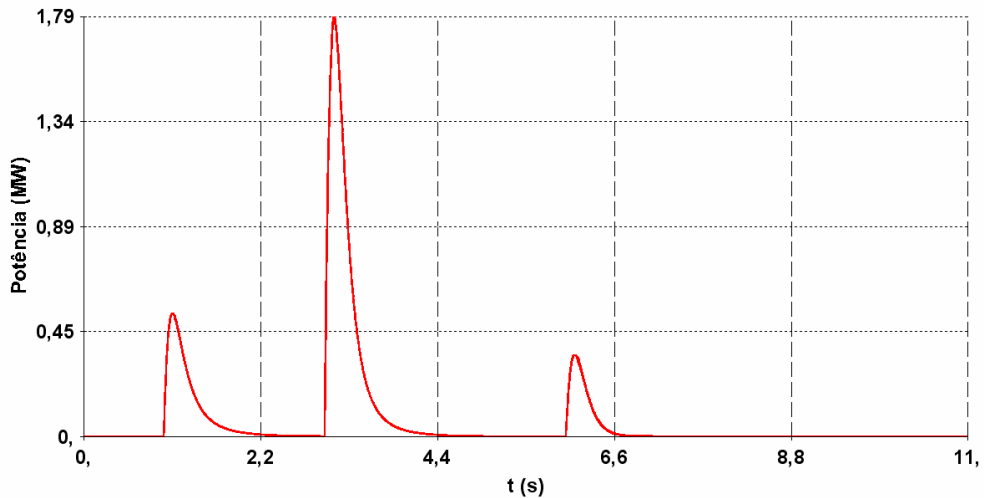
A Figura 4.6 apresenta a defasagem angular imposta ao VFT pelo servo motor. Para as condições analisadas, a defasagem angular no VFT (transformador rotativo) assume valores na faixa de + 22,1 graus e -21,5 graus.

Os valores estabilizados em +22,1 graus e -21,5 graus comentados no parágrafo acima correspondem, respectivamente, às transferências de 100 MW do sistema 1 para o sistema 2 e de 100 MW no sentido inverso, ou seja, do sistema 2 para o sistema 1.



**Figura 4.6 – Defasagem angular no VFT (graus).**

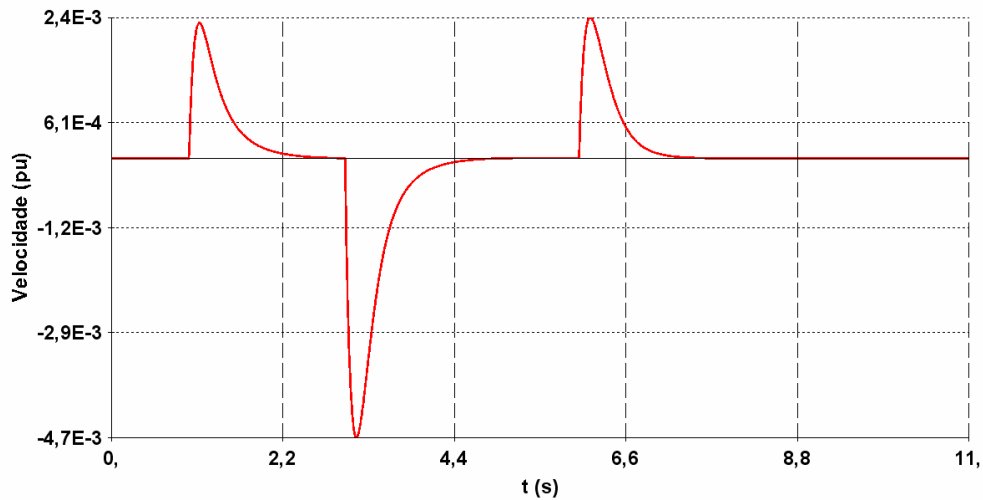
A Figura 4.7 apresenta a potência mecânica do servo motor. Observa-se que a troca de energia entre o transformador rotativo e o acionamento eletromecânico só ocorre nos instantes em que a referência de potência é modificada. Na simulação, a potência mecânica assume valores máximos de 1,79 MW para a troca de referência de 100 MW para -100 MW.



**Figura 4.7 – Potência mecânica entregue ao VFT pelo acionamento eletromecânico.**

Nos períodos em que o fluxo de potência no VFT é constante, a energia trocada entre o transformador rotativo e o acionamento eletromecânico é nula. Este comportamento está coerente com (2-56), pois as frequências do rotor e estator do VFT são iguais, o que nos leva a  $P_d=0$ . Ou seja, em regime permanente a potência entregue ao eixo do VFT é zero.

A Figura 4.8 apresenta a velocidade do rotor do VFT em pu para as condições analisadas. Observa-se que a velocidade do VFT é zero nos instantes em que este transfere energia de forma estável. Este comportamento está coerente com (2-43), sabendo que as frequências nos sistemas interligados pelo VFT são iguais.



**Figura 4.8 – Velocidade do rotor do VFT em pu.**

A Figura 4.9 apresenta o torque aplicado ao eixo do VFT pelo servo motor. Para as condições analisadas, o torque assume valores entre -4,0 e + 2,54 pu. Ressalta-se que foram incluídos limitadores para o sinal de torque gerado pelo controlador, razão pela qual o torque é limitado em -4,0 pu no evento de inversão de potência.

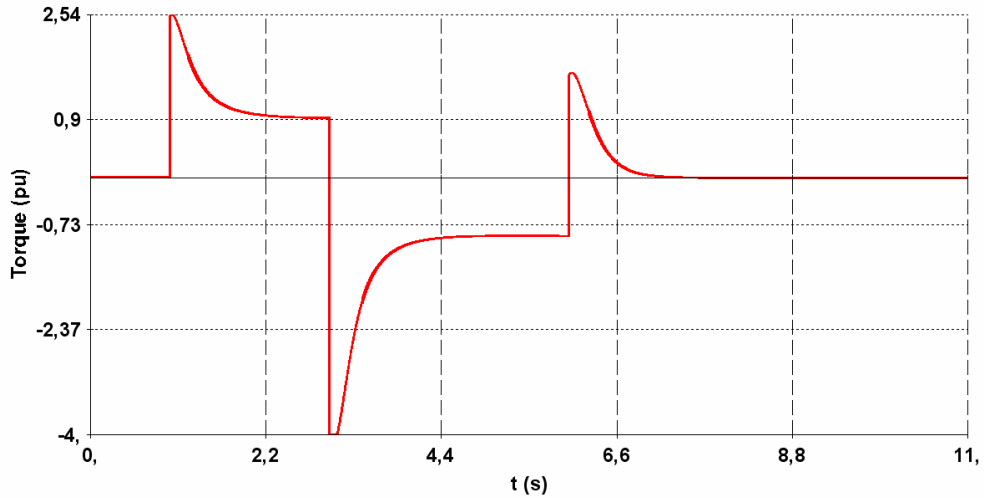


Figura 4.9 – Torque aplicado ao eixo do VFT (pu) limitado em  $\pm 4.0$  pu.

A Figura 4.10 apresenta a tensão medida nos terminais do VFT. Nota-se que a variação no fluxo de potência conduz a uma variação nas tensões envolvidas. Como exposto no Capítulo 2, o perfil de tensão depende do nível de curto-circuito dos sistemas interligados.

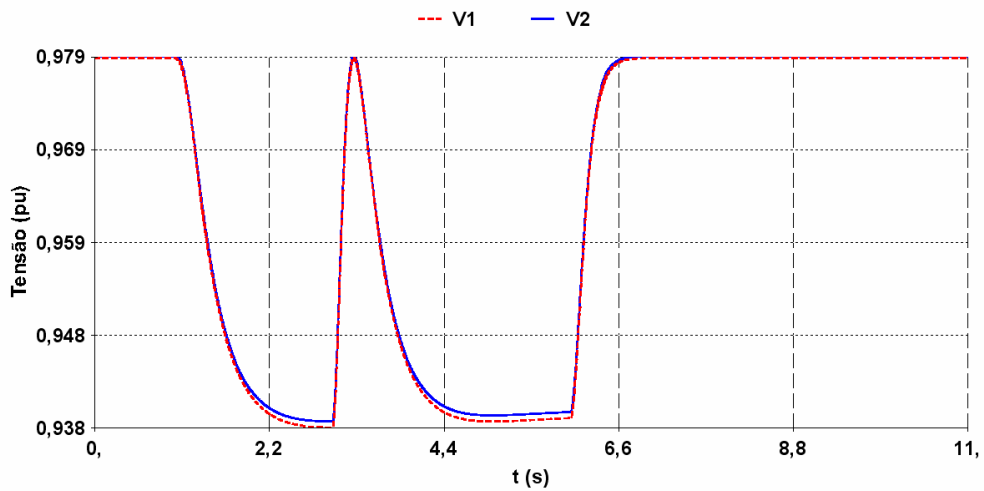


Figura 4.10 – Valor da tensão nos terminais do VFT (pu).

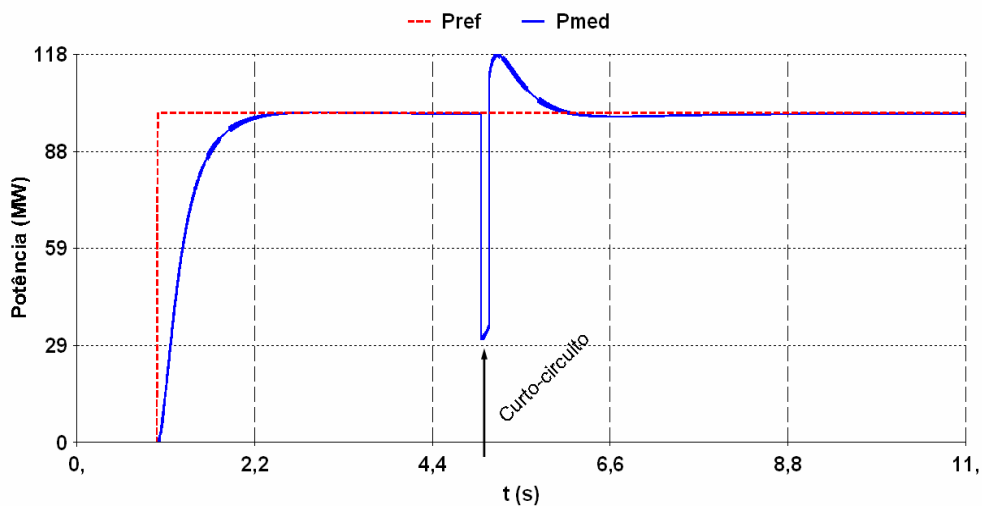
#### 4.3.1.2 Caso 2: Mudança de referência de potência e curto-circuito trifásico

Os itens a seguir apresentam os principais aspectos considerados na simulação do Caso 2:



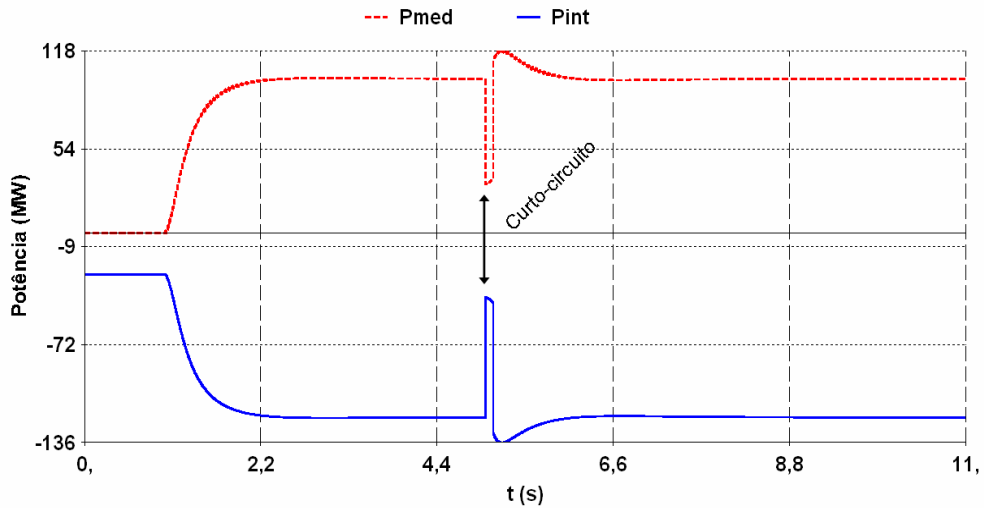
- ✓ Foi realizado um curto-circuito trifásico com resistência para a terra de  $8\Omega$  no barramento de alta do transformador que interliga o VFT ao sistema equivalente 1;
- ✓ A simulação foi realizada em uma janela de tempo de 11 segundos;
- ✓ As frequências dos sistemas equivalentes não variam no tempo;
- ✓ A simulação considera variação na potência de referência de zero para 100 MW ( $t=1s$ ), curto-circuito trifásico ( $t=5s$ ) e extinção do defeito ( $t=5,1s$ );
- ✓ Não foram realizadas manobras em bancos de capacitores.
- ✓ Os ângulos das fontes foram ajustados para que o intercâmbio na interligação em corrente alternada fosse inicialmente de 27 MW (do sistema 2 para o sistema 1).

A Figura 4.11 apresenta o sinal de referência de potência para o VFT e a potência medida que atravessa o equipamento. Observa-se que o modelo segue a referência de potência, com amortecimento satisfatório, mesmo após a ocorrência do curto-circuito trifásico.



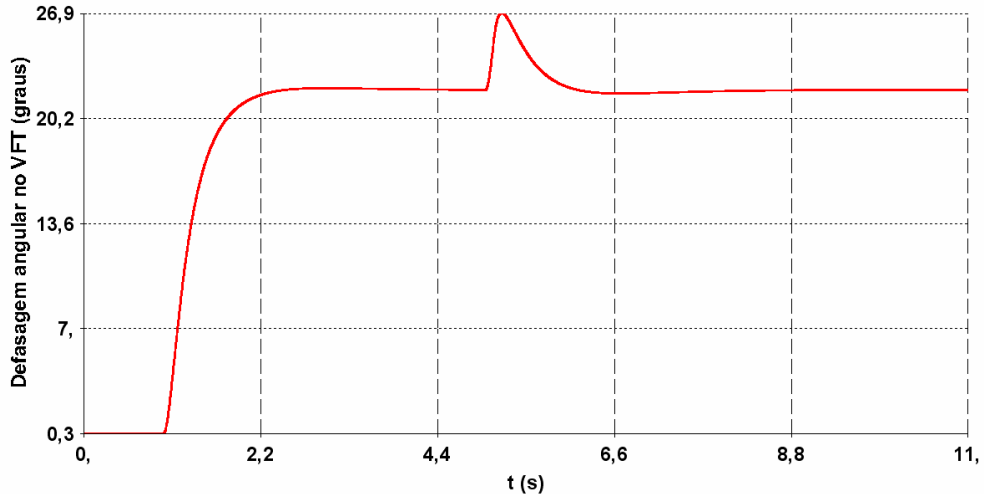
**Figura 4.11 - Potência de referência e medida no VFT.**

A Figura 4.12 apresenta os fluxos de potência ativa no VFT ( $P_{med}$ ) e na interligação em corrente alternada ( $P_{int}$ ). Observa-se que inicialmente, o fluxo na interligação era de 27 MW, do sistema 2 para o sistema 1 (valor negativo na figura). Observa-se que a potência ativa no VFT e na interligação são modificados nos períodos de variação da referência de potência e na ocorrência do curto-circuito trifásico.



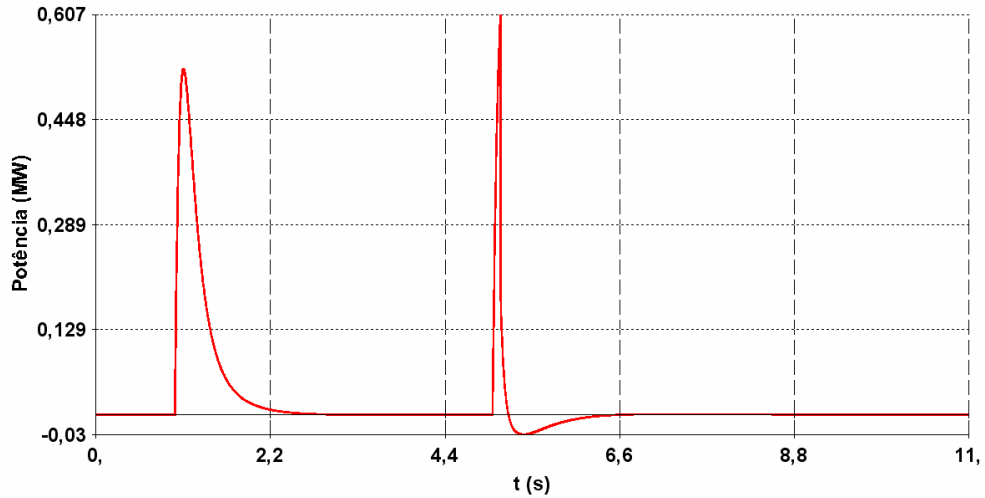
**Figura 4.12 – Potência ativa na interligação e no VFT**

A Figura 4.13 apresenta a defasagem angular imposta ao VFT pelo servo motor. Para as condições analisadas, a defasagem angular assume valores na faixa de 0 a 26,9 graus. Observa-se que a defasagem angular imposta pelo VFT muda nos períodos de variação da referência de potência e na ocorrência do curto-circuito trifásico.



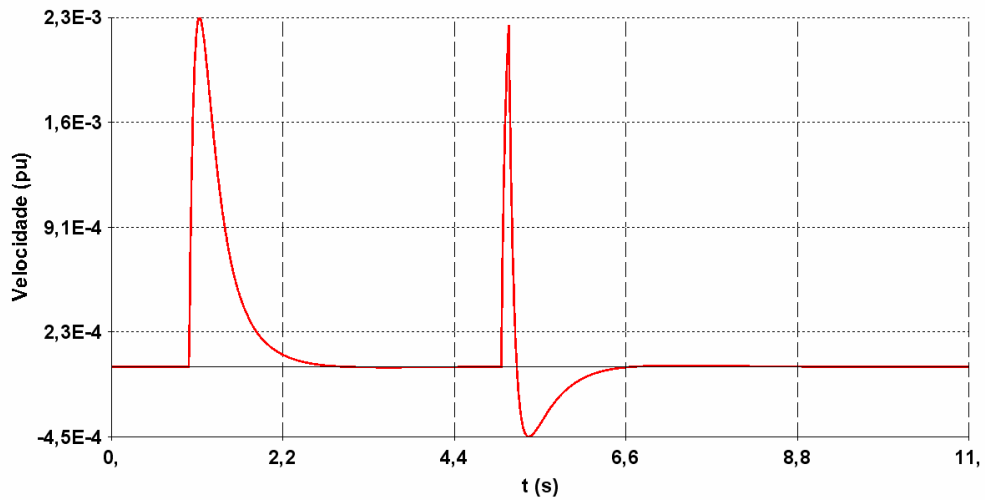
**Figura 4.13 – Defasagem angular no VFT (graus).**

A Figura 4.14 apresenta a potência mecânica do servo motor. Observa-se que a troca de energia entre o transformador rotativo e o servo motor só ocorre nos instantes em que a referência de potência é alterada e na ocorrência do evento de curto-circuito trifásico. Na simulação, a potência mecânica assume valores máximos de 0,607 MW no evento de curto-circuito trifásico.



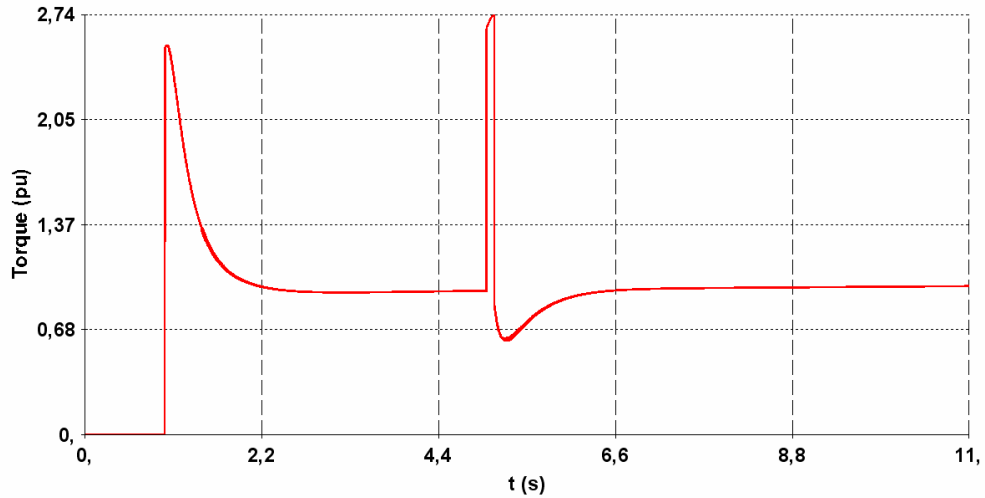
**Figura 4.14 – Potência mecânica entregue ao VFT pelo acionamento eletromecânico.**

A Figura 4.15 apresenta a velocidade do rotor do VFT em pu para as condições analisadas. Observa-se variação na velocidade do rotor na ocorrência dos eventos de variação da referência de potência e no curto-circuito.



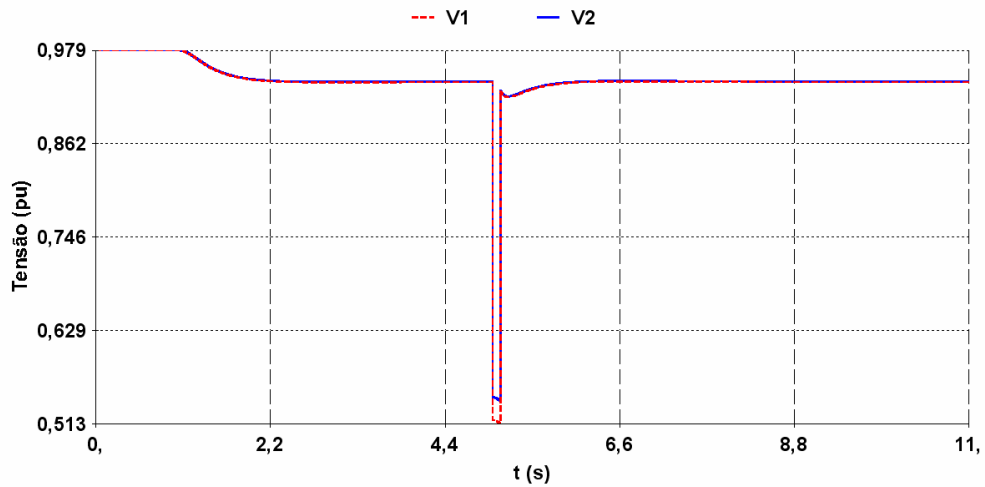
**Figura 4.15 – Velocidade do rotor do VFT em pu.**

A Figura 4.16 apresenta o torque aplicado ao eixo do VFT pelo servo motor. Para as condições analisadas, o torque assume valores entre 0,0 e + 2,74 pu. Ressalta-se que o sinal de torque gerado pelo controlador é inferior ao limite de 4,0 pu.



**Figura 4.16 – Torque aplicado ao eixo do VFT (pu).**

A Figura 4.17 apresenta a tensão nos terminais do VFT. Observa-se que a modificação do fluxo de potência e a ocorrência do curto-circuito trifásico conduziram a variações de tensão nos sistemas envolvidos.



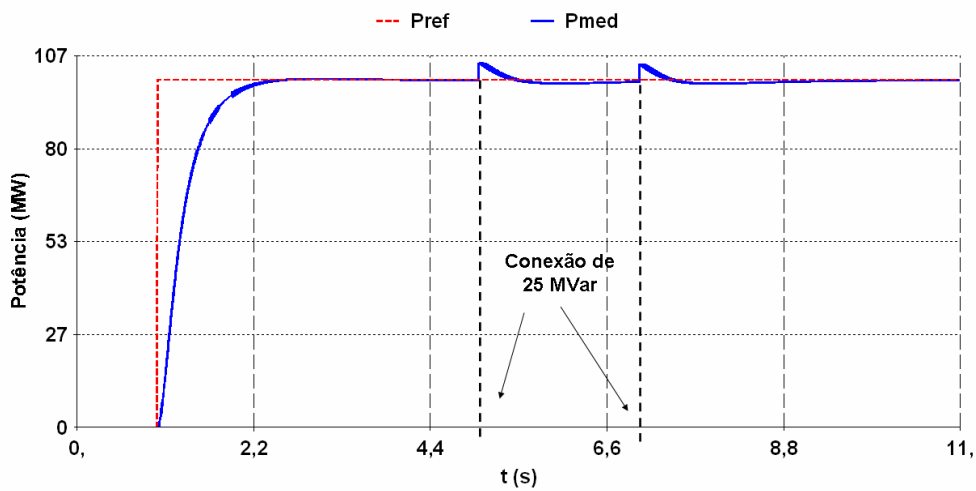
**Figura 4.17 – Tensão nos terminais do VFT (pu)**

**4.3.1.3 Caso 3: Mudança de referência de potência, com frequência constante e com manobra de banco de capacitores**

- ✓ A simulação é realizada em uma janela de tempo de 11 segundos;
- ✓ As frequências dos sistemas equivalentes não variam no tempo;

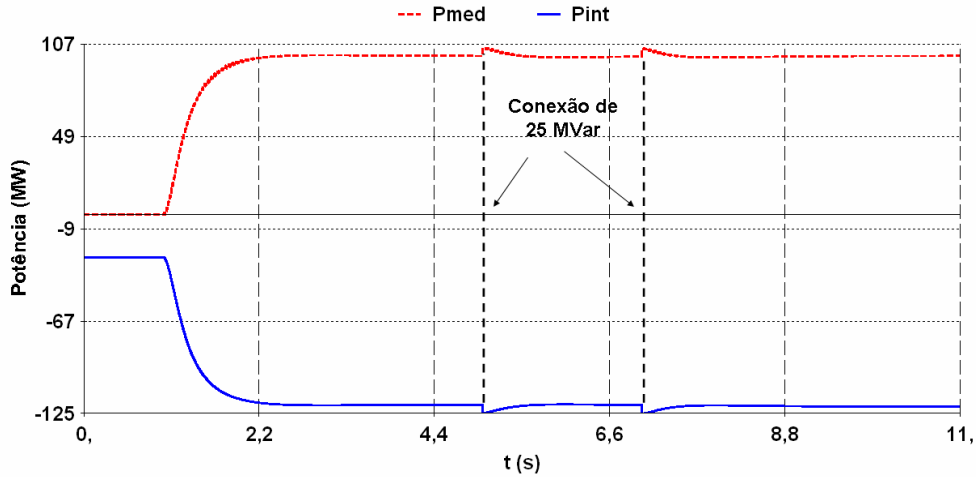
- ✓ A simulação considera variação na potência de referência de zero para 100 MW ( $t=1s$ ) e conexão de bancos de capacitores de 25 Mvar ( $t=5s$  e  $t=7s$ );
- ✓ Os ângulos das fontes foram ajustados para que o intercâmbio na interligação em corrente alternada fosse inicialmente de 27 MW (do sistema 2 para o sistema 1).

A Figura 4.15 apresenta o sinal de referência de potência utilizado pelo controlador do VFT e a potência medida que atravessa o equipamento. Observam-se variações transitórias de potência no VFT quando da inserção dos bancos de capacitores ( $t=5s$  e  $7s$ ), todas na faixa de 5 MW.



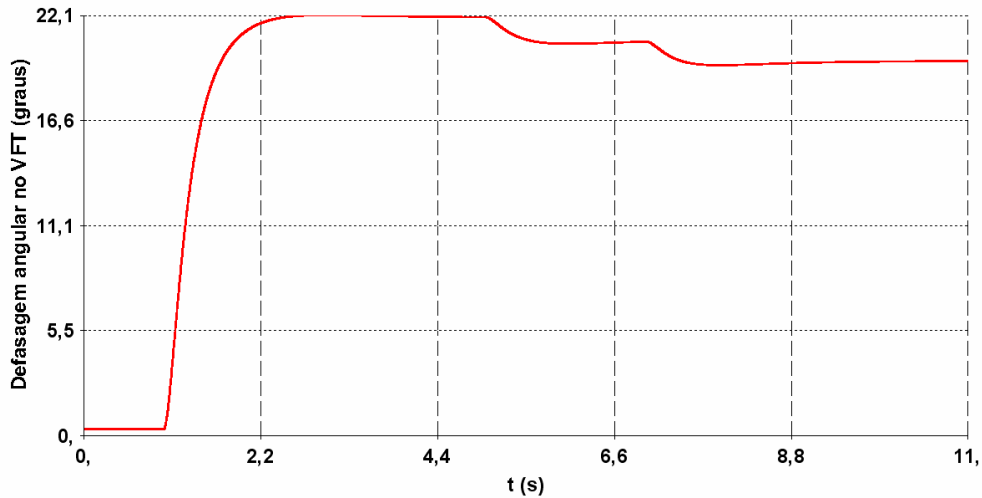
**Figura 4.18 – Potência de referência e medida no VFT.**

A Figura 4.19 apresenta os fluxos de potência ativa no VFT ( $P_{med}$ ) e na interligação em corrente alternada ( $P_{int}$ ). Observa-se que, inicialmente, o fluxo na interligação era de 27 MW, do sistema 2 para o sistema 1 (valor negativo na figura). Observa-se que a potência ativa no VFT e na interligação foram modificadas nos períodos de variação da referência de potência e inserção dos bancos de capacitores ( $t=5s$  e  $t=7s$ ).



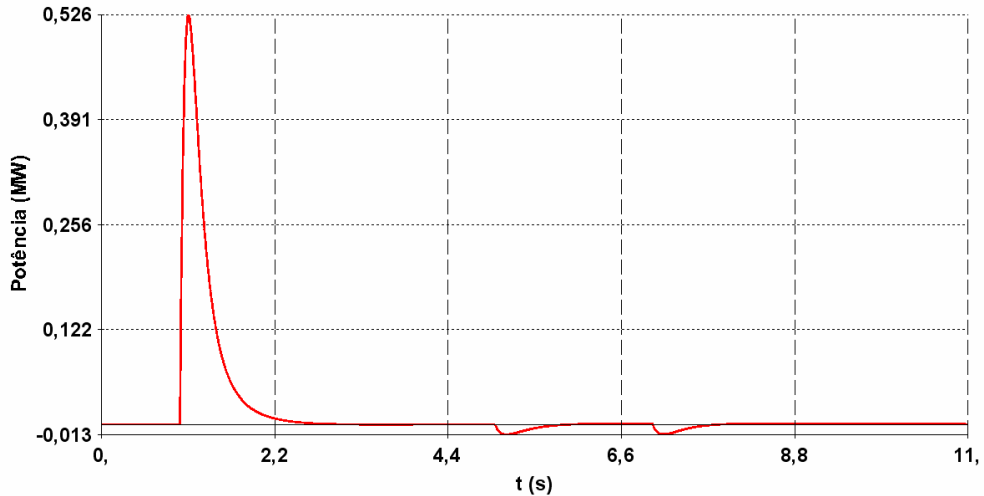
**Figura 4.19 – Potência ativa na interligação e no VFT**

A Figura 4.20 apresenta a defasagem angular imposta ao VFT pelo servo motor. Notam-se melhorias no perfil de tensão (Figura 4.24) após a inserção dos bancos de capacitores ( $t=5s$  e  $t=7s$ ), conduzindo a uma redução na defasagem angular imposta pelo servo motor (aproximadamente 2,2 graus para a inserção de dois bancos de 25 Mvar). De fato, a melhoria do perfil de tensão conduz ao aumento das margens de estabilidade dinâmica do sistema.



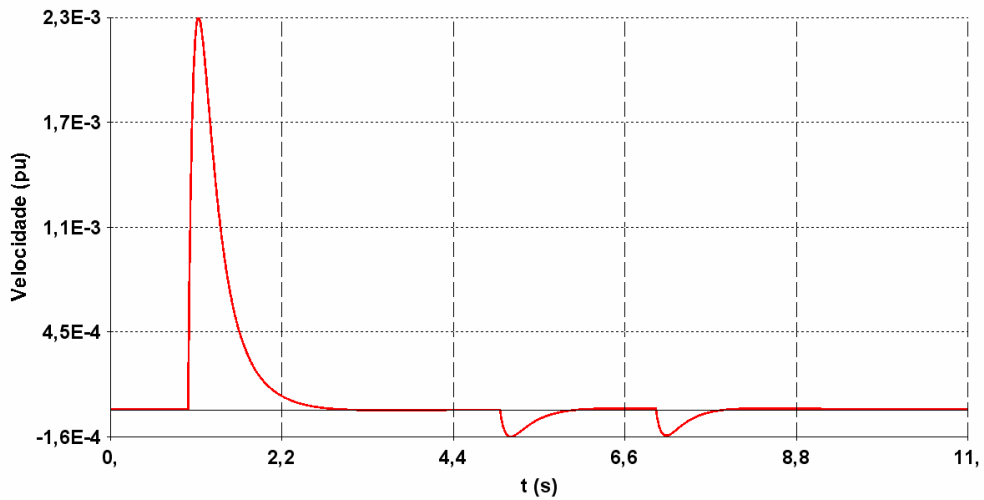
**Figura 4.20 – Defasagem angular no VFT (graus).**

A Figura 4.21 apresenta a potência mecânica do servo motor. Observam-se pequenas variações na potência mecânica nos instantes de inserção dos bancos de capacitores (aproximadamente 0,013 MW na entrada de cada banco de 25 Mvar).



**Figura 4.21 - Potência mecânica entregue ao VFT pelo servo motor.**

A Figura 4.22 apresenta a velocidade do rotor do VFT em pu para as condições analisadas. Nota-se que a conexão dos bancos de capacitores não impõe variações expressivas na velocidade de rotação do rotor do VFT.



**Figura 4.22 – Velocidade do rotor do VFT em pu.**

A Figura 4.23 apresenta o torque aplicado ao eixo do VFT pelo acionamento eletromecânico. Observa-se que a conexão dos bancos de capacitores não impõe variações expressivas no sinal de torque gerado pelo controlador.

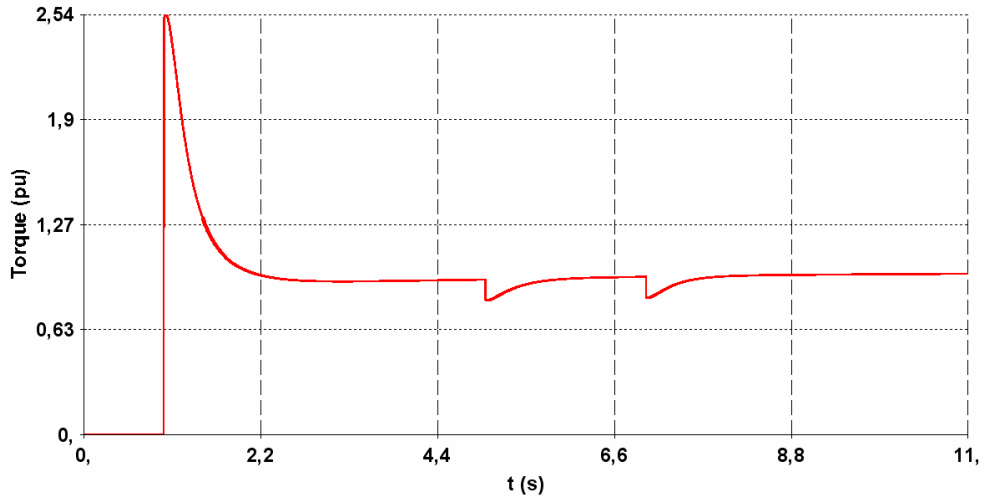


Figura 4.23 – Torque aplicado ao eixo do VFT pelo servo motor.

A Figura 4.24 apresenta as tensões nos terminais do VFT. Observa-se que com a inserção dos bancos de capacitores ( $t=5s$  e  $t=7s$ ) de 25 Mvar há elevação dos perfis de tensão nos terminais do equipamento, proporcionando um aumento das margens de estabilidade dinâmica do sistema.

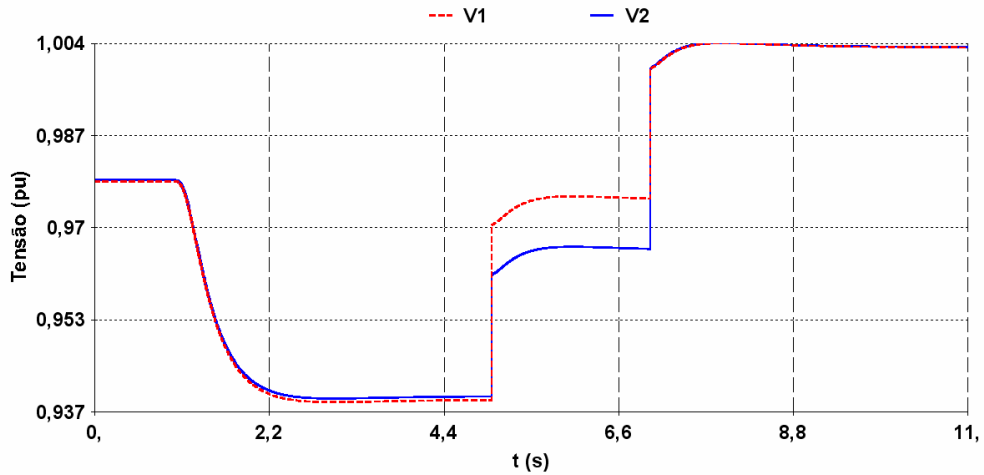


Figura 4.24 – Tensões nos terminais do VFT

### 4.3.2 Resposta Dinâmica do VFT em Conexão Assíncronas de Mesma Frequência Nominal

Nesta Seção considera-se a conexão do VFT com dois sistemas elétricos síncronos, onde o VFT é o único equipamento de conexão entre estes dois sistemas elétricos, como



exposto na Figura 4.3. Ressalta-se que o sistema aqui representado é o que será comparado com os resultados adquiridos nas referências [5] e [15]. Os parâmetros utilizados no controle para esta configuração encontram-se indicados na Tabela 5.

**Tabela 4 : Parâmetros do controle em conexões assíncronas.**

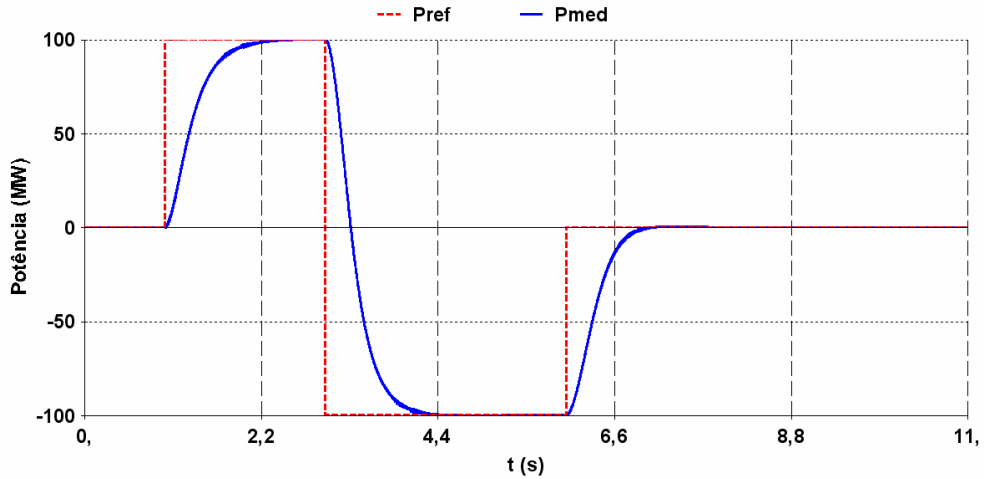
Parâmetros	Unidades	Valores
$K_p$	pu	2,5
$K_i$	pu	2,5
$K$	pu	550
LimT	pu	4,0
$T_a$	segundos	10
$H_{VFT}$	segundos	26,2
$\omega_b$	Rad/s	376,99

#### 4.3.2.1 Caso 4: Mudança de Referência de potência, com frequência constante e sem manobra de banco de capacitores

Os itens a seguir apresentam os principais aspectos considerados na simulação do Caso 4 de conexão síncrona:

- ✓ A simulação é realizada em uma janela de tempo de 11 segundos;
- ✓ As frequências dos sistemas equivalentes não variam no tempo;
- ✓ A simulação considera variação na potência de referência de zero para 100 MW ( $t=1s$ ), de 100 MW para -100 MW ( $t=3s$ ) e de -100 MW para 0 MW ( $t=6s$ );
- ✓ Não foram realizadas manobras em bancos de capacitores;
- ✓ Os ângulos das fontes foram ajustados para que o intercâmbio na interligação fosse inicialmente zero.

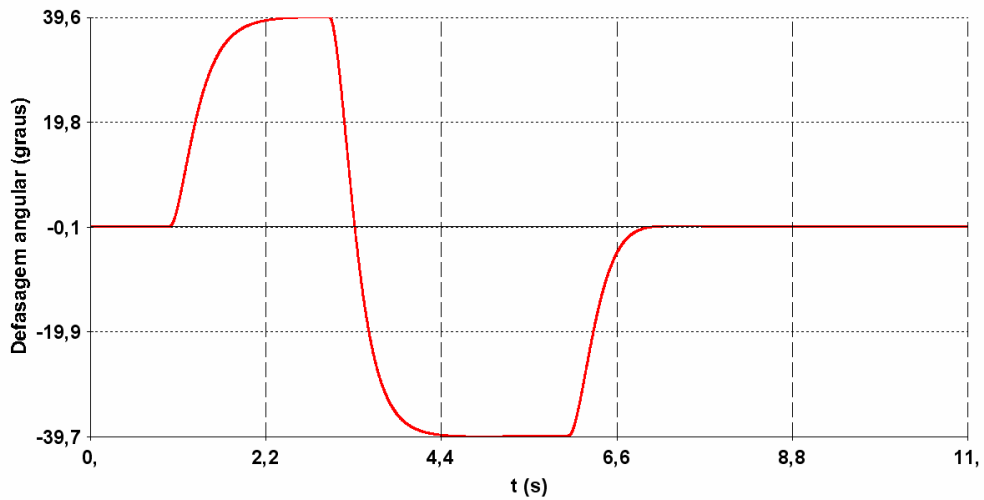
A Figura 4.25 apresenta o sinal de referência de potência para o VFT e a potência medida que atravessa o equipamento. Observa-se que o modelo segue a referência de potência, de forma estável, assim como ao apresentado anteriormente no caso 1.



**Figura 4.25 – Potência de referência e medida no VFT.**

A Figura 4.26 apresenta a defasagem angular imposta ao VFT pelo servo motor. Para as condições analisadas, a defasagem angular no VFT assume valores na faixa de +39,6 graus e -39,7 graus.

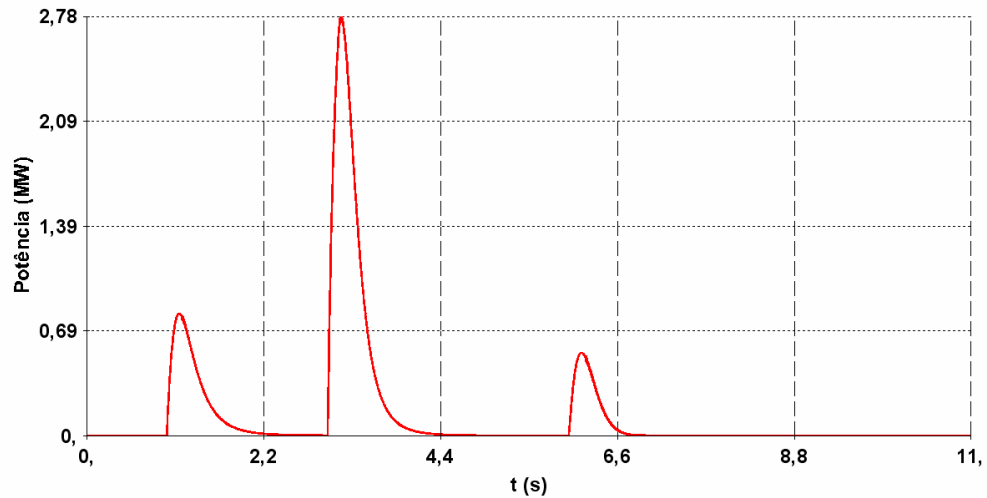
Os valores estabilizados em +39,6 graus e -39,7 graus correspondem, respectivamente, às transferências de 100 MW do sistema 1 para o sistema 2 e de 100 MW no sentido inverso, ou seja, do sistema 2 para o sistema 1.



**Figura 4.26 – Defasagem angular no VFT (graus).**

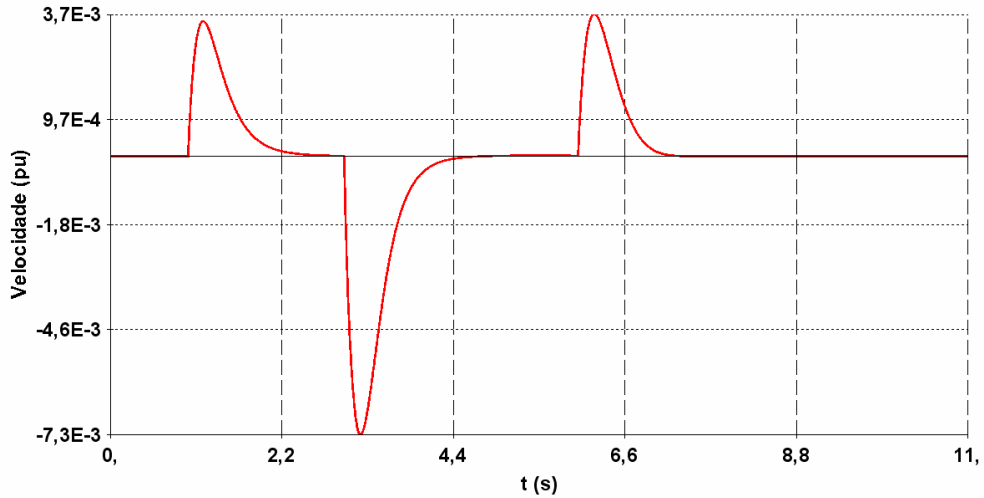
A Figura 4.27 apresenta a potência mecânica entregue ou recebida do VFT pelo servo motor. Observa-se que, na simulação, a potência mecânica assume valores máximos de 2,78 MW para a troca de referência de 100 MW para -100 MW. Nota-se

que para esta configuração, na qual o VFT é o único equipamento interligador dos sistemas, houve uma ampliação da potência mecânica da ordem de 1,5 vezes a apresentada na Figura 4.7.



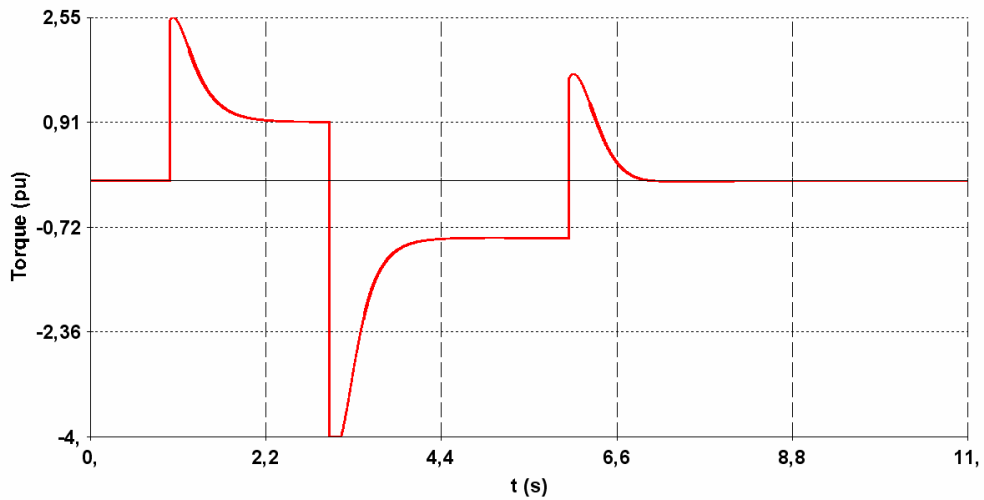
**Figura 4.27 – Potência mecânica entregue ao VFT pelo servo motor.**

A Figura 4.28 apresenta a velocidade do rotor do VFT em pu para as condições analisadas. Observa-se que a velocidade do VFT é zero nos instantes que o VFT transfere energia de forma estável. Nota-se também que para esta configuração houve uma elevação nos picos da velocidade de rotação do rotor de aproximadamente 50% da apresentada na Figura 4.8.



**Figura 4.28 – Velocidade do rotor do VFT em pu**

A Figura 4.29 apresenta o torque aplicado ao eixo do VFT pelo servo motor. Para as condições analisadas, o torque assume valores entre 2,55 e -4,0 pu; ressalta-se que, semelhante ao Caso1, os limitadores para o sinal de torque gerado pelo controlador limita o mesmo a -4,0 pu no evento de inversão de potência.



**Figura 4.29 – Torque aplicado ao eixo do VFT pelo servo motor.**

A Figura 4.30 apresenta a tensão medida nos terminais do VFT. Nota-se que a variação no fluxo de potência conduz a uma variação nas tensões envolvidas. Nota-se também que para variação em degrau do fluxo de potência ativa que atravessa o VFT, a tensão em seus terminais excursiona entre valor de aproximadamente 0,92 pu a 0,98 pu.

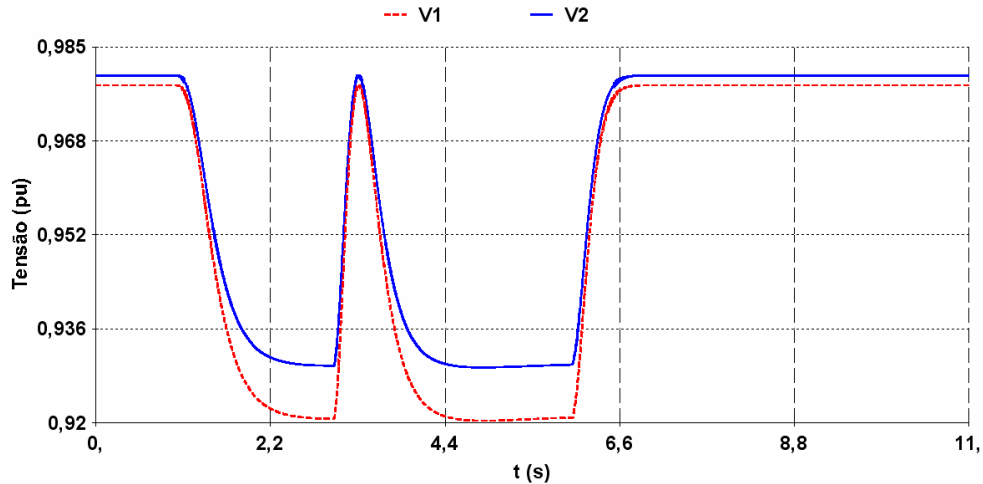


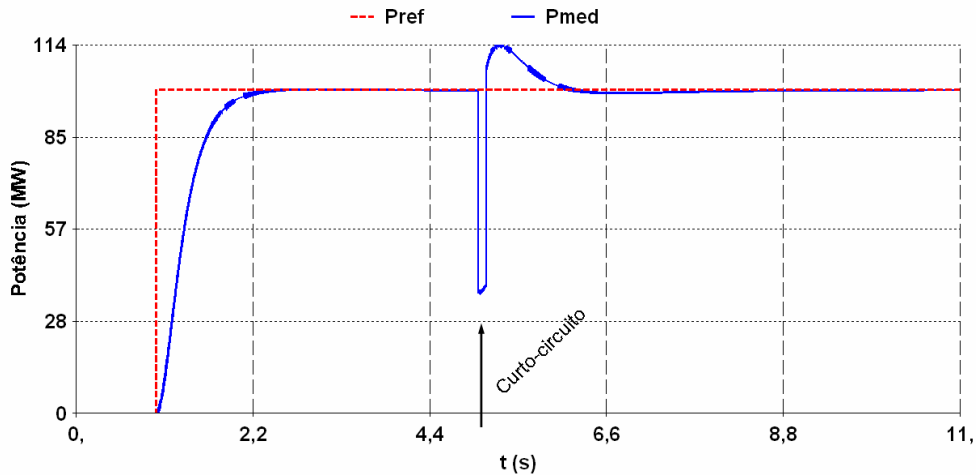
Figura 4.30 – Tensão nos terminais do VFT.

#### 4.3.2.2 Caso 5: Mudança de Referência de potência e curto-circuito trifásico

Os itens a seguir apresentam os principais aspectos considerados na simulação do Caso 5:

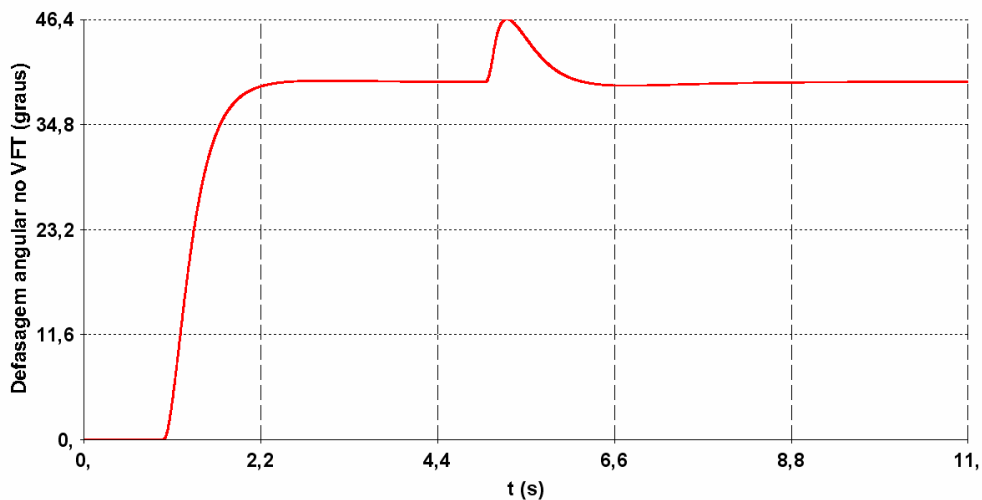
- ✓ Foi realizado um curto-circuito trifásico com resistência para a terra de  $8\Omega$  no barramento de alta do transformador que interliga o VFT ao sistema equivalente 1;
- ✓ A simulação é realizada em uma janela de tempo de 11 segundos;
- ✓ As frequências dos sistemas equivalentes não variam no tempo;
- ✓ A simulação considera variação na potência de referência de zero para 100 MW ( $t=1s$ ), curto-circuito trifásico ( $t=5s$ ) e extinção do defeito ( $t=5.1s$ );
- ✓ Não foram realizadas manobras em bancos de capacitores;
- ✓ Os ângulos das fontes foram ajustados para que o intercâmbio na interligação fosse inicialmente zero.

A Figura 4.31 apresenta o sinal de referência de potência para o VFT e a potência medida que atravessa o equipamento. Observa-se que o modelo segue a referência de potência com amortecimento satisfatório.



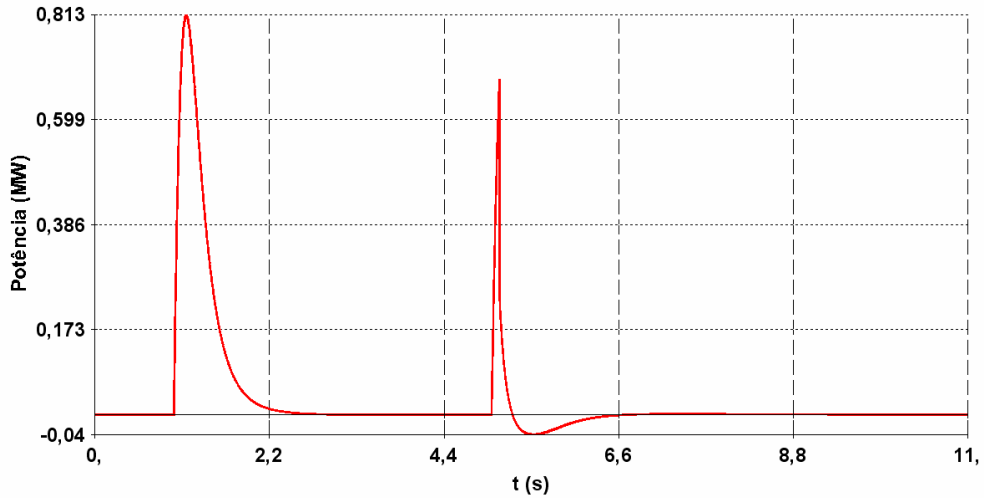
**Figura 4.31 – Potência de referência e medida no VFT.**

A Figura 4.32 apresenta a defasagem angular imposta ao VFT pelo servo motor. Para as condições analisadas, a defasagem angular assume valores na faixa de 0 a 46,4 graus. Observa-se que a defasagem angular imposta pelo VFT muda nos períodos de variação da referência de potência e na ocorrência do curto-circuito trifásico.



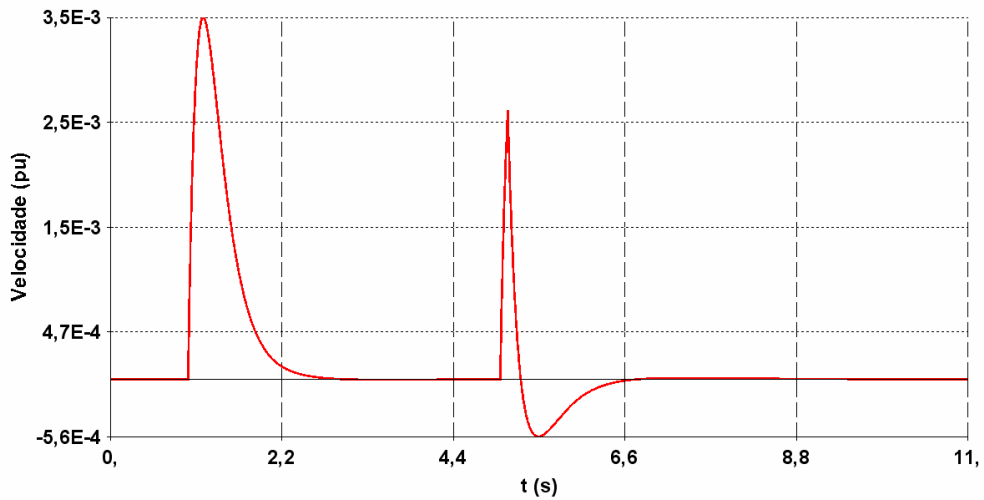
**Figura 4.32 – Defasagem angular no VFT (graus).**

A Figura 4.33 apresenta a potência mecânica do servo motor. Observa-se que a troca de energia entre o transformador rotativo e o servo motor só acontece nos instantes em que a referência de potência é alterada e na ocorrência de curto-circuito trifásico. Na simulação, a potência mecânica assume valores máximos de 0,813 MW de variação em degrau da potência.



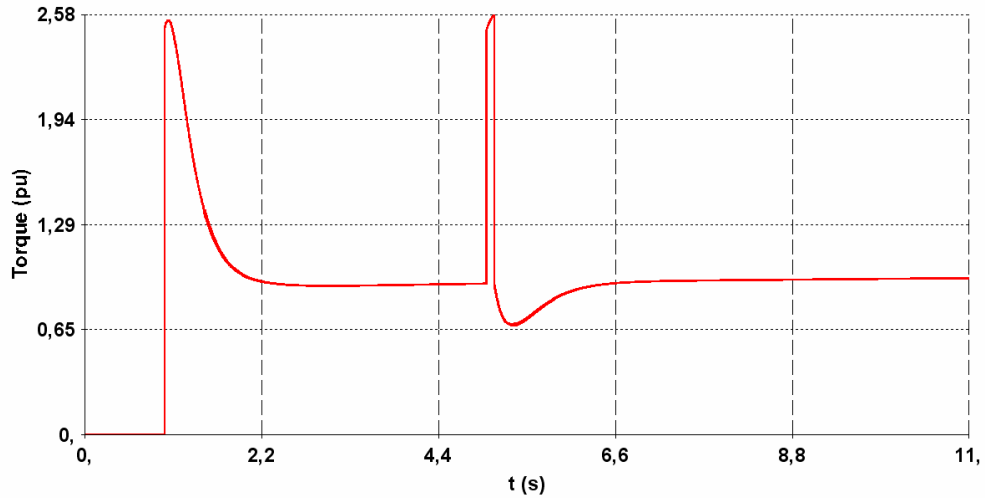
**Figura 4.33 - Potência mecânica entregue ao VFT pelo servo motor.**

A Figura 4.34 apresenta a velocidade do rotor do VFT em pu para as condições analisadas. Observa-se variação na velocidade do rotor na ocorrência dos eventos de variação da referência de potência e curto-circuito trifásico.



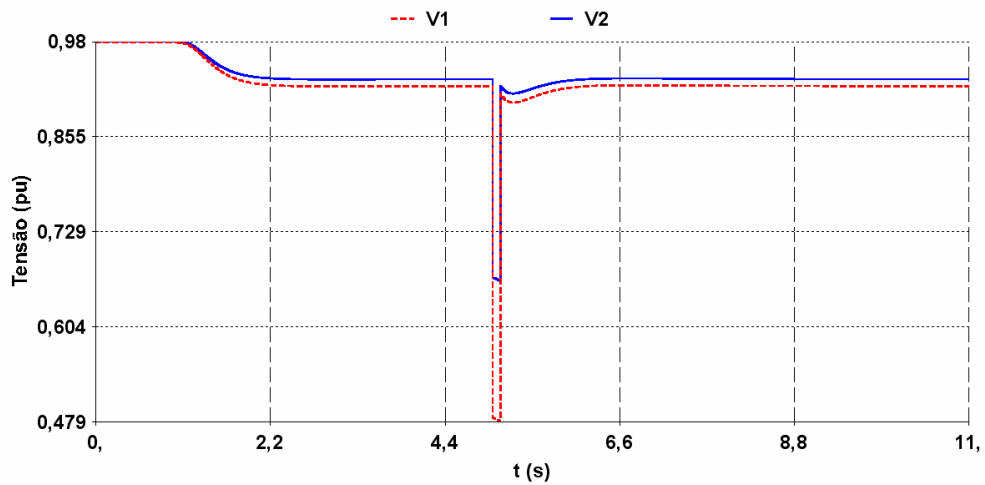
**Figura 4.34 – Velocidade do rotor do VFT em pu.**

A Figura 4.35 apresenta o torque aplicado ao eixo do VFT pelo servo motor. Para as condições analisadas, o torque assume valores entre 0,0 e + 2,58 pu. Ressalta-se que, apesar de o limitador estar representado, o sinal de torque gerado pelo controlador é inferior ao limite de 4,0 pu imposto pelo limitador.



**Figura 4.35 – Torque aplicado ao eixo do VFT pelo servo motor.**

A Figura 4.36 apresenta a tensão nos terminais do VFT. Observa-se que a modificação do fluxo de potência e a ocorrência de curto-circuito trifásico conduziram a variações de tensão nos sistemas envolvidos.



**Figura 4.36 – Tensão nos terminais do VFT.**

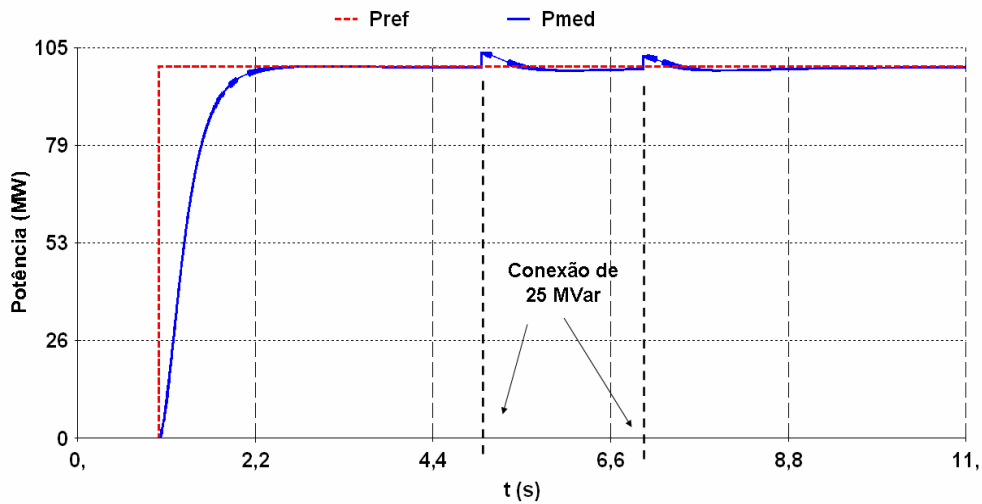
#### **4.3.2.3 Caso 6: Mudança da Referência de potência, com frequência constante e com manobra de banco de capacitores**

- ✓ A simulação é realizada em uma janela de tempo de 11 segundos;
- ✓ As frequências dos sistemas equivalentes não variam no tempo;



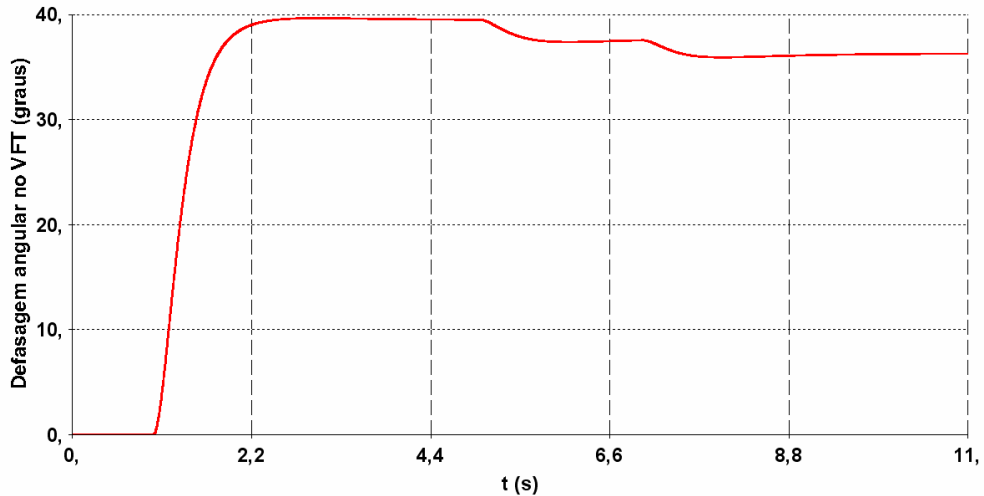
- ✓ A simulação considera variação na potência de referência de zero para 100 MW ( $t=1s$ ) e conexão de bancos de capacitores de 25 Mvar ( $t=5s$  e  $t=7s$ );
- ✓ Os ângulos das fontes foram ajustados para que o intercâmbio na interligação fosse inicialmente zero.

A Figura 4.37 apresenta o sinal de referência de potência utilizado pelo controlador do VFT e a potência medida que atravessa o equipamento. Observam-se variações transitórias de potência no VFT quando da inserção dos bancos de capacitores ( $t=5s$  e  $7s$ ), todas na faixa de 4 MW.



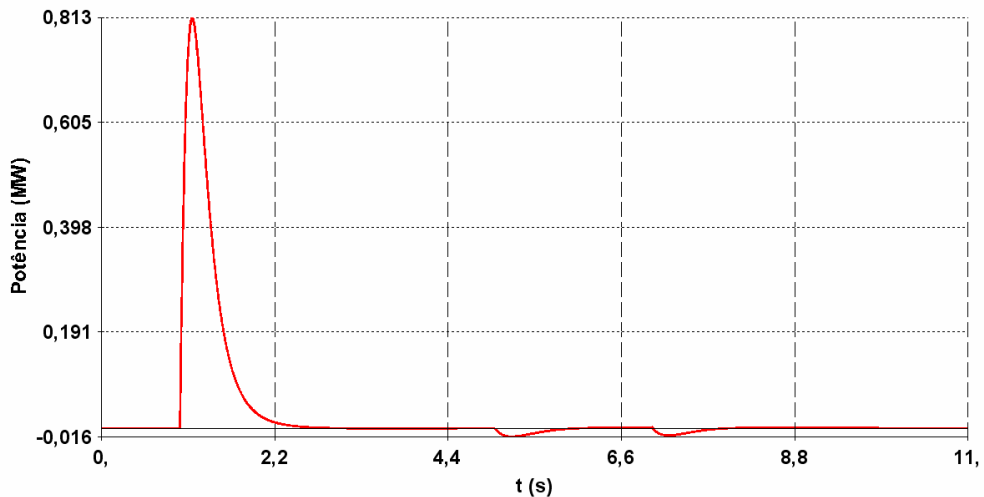
**Figura 4.37 – Sinal de referência e potência ativa no VFT.**

A Figura 4.38 apresenta a defasagem angular imposta ao VFT pelo servo motor. Notam-se melhorias no perfil de tensão (Figura 4.42) após a inserção dos bancos de capacitores ( $t=5s$  e  $t=7s$ ), conduzindo a uma redução na defasagem angular imposta pelo servo motor (aproximadamente 3,2 graus para a inserção de dois bancos de 25 Mvar). De fato, a melhoria do perfil de tensão conduz ao aumento das margens de estabilidade dinâmica do sistema.



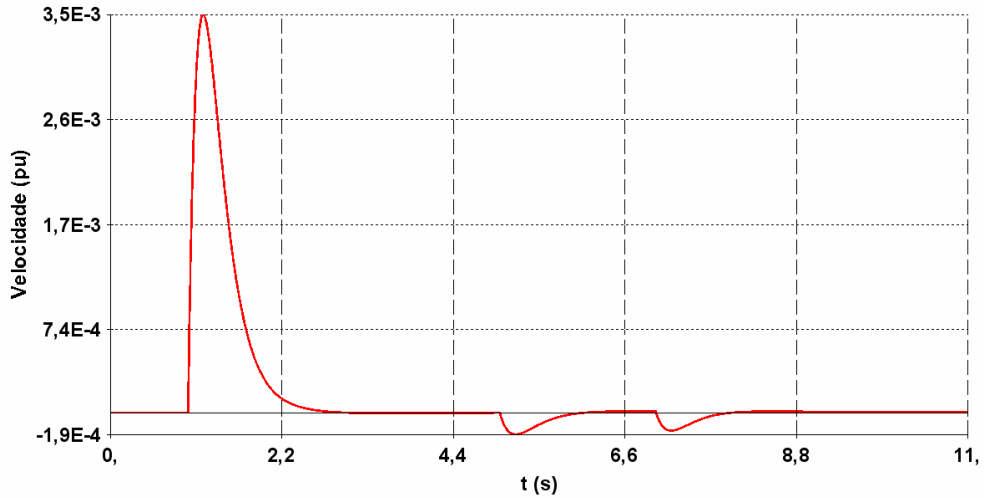
**Figura 4.38 – Defasagem angular no VFT (graus).**

A Figura 4.39 apresenta a potência mecânica do servo motor. Observam-se pequenas variações na potência mecânica nos instantes de inserção dos bancos de capacitores (aproximadamente 0,016 MW na entrada de cada banco de 25 Mvar).



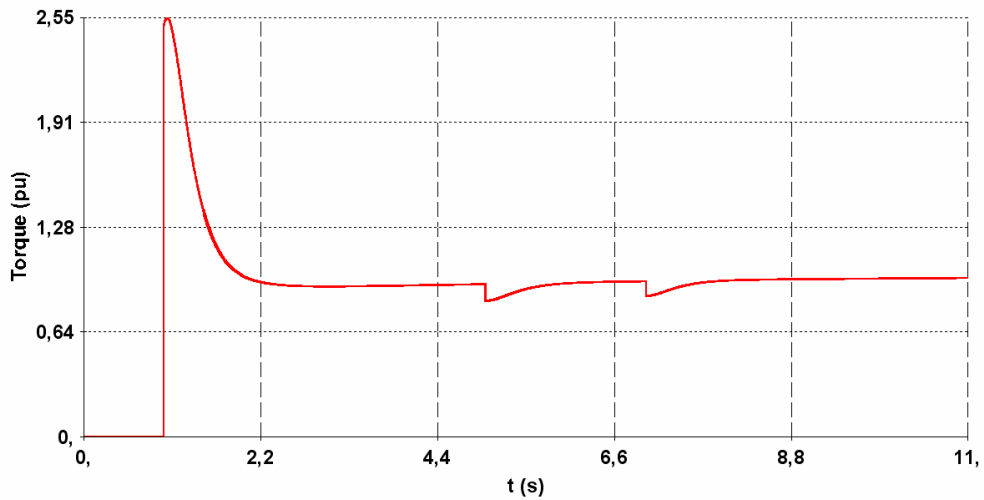
**Figura 4.39 – Potência mecânica entregue ao VFT pelo servo motor.**

A Figura 4.40 apresenta a velocidade do rotor do VFT em pu para as condições analisadas. Observa-se que a conexão dos bancos de capacitores não impõe variações expressivas na velocidade de rotação do rotor do VFT.



**Figura 4.40 – Velocidade do rotor do VFT em pu.**

A Figura 4.41 apresenta o torque aplicado ao eixo do VFT pelo acionamento eletromecânico. Observa-se que a conexão dos bancos de capacitores não impõe variações expressivas no sinal de torque gerado pelo controlador.



**Figura 4.41 - Torque aplicado ao eixo do VFT pelo acionamento eletromecânico.**

A Figura 4.42 apresenta as tensões nos terminais do VFT. Observa-se que, com a inserção dos bancos de capacitores ( $t=5s$  e  $t=7s$ ) de 25 Mvar, há elevação dos perfis de tensão nos terminais do equipamento, proporcionando um aumento das margens de estabilidade dinâmica do sistema.

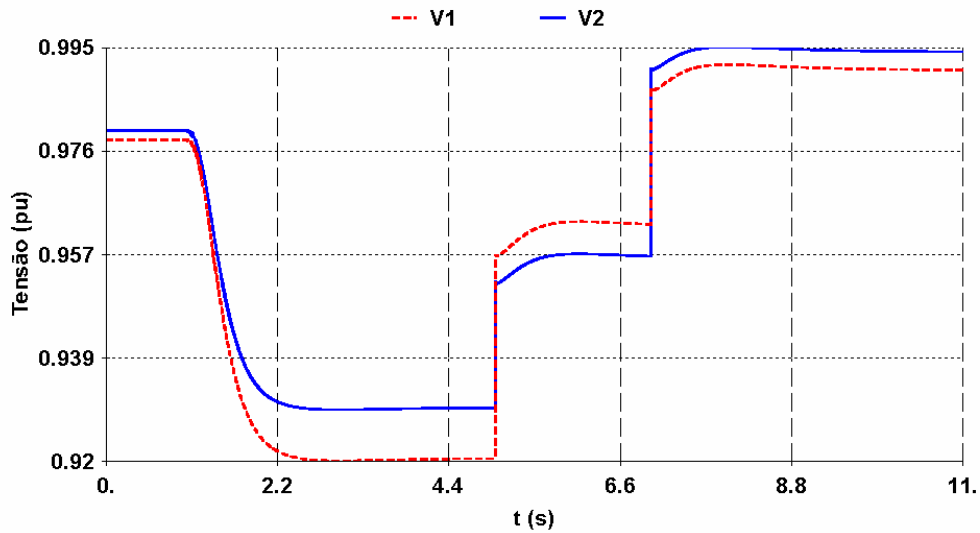


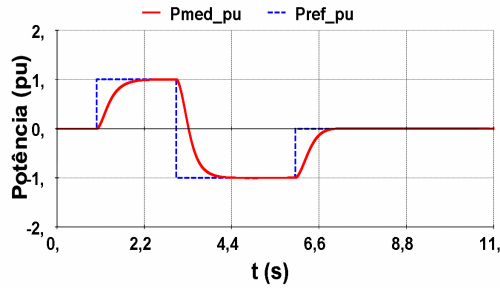
Figura 4.42 – Tensão nos terminais do VFT.

## 4.4 Comparação dos Resultados

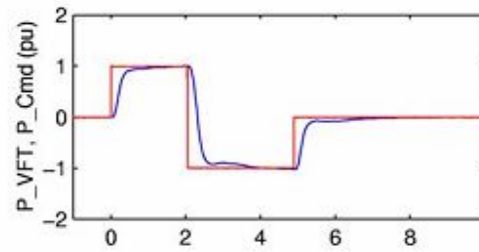
Nas seções anteriores foram apresentados os resultados referentes ao modelo desenvolvido no ANATEM para as diferentes alternativas de interligação e suas condições operativas, tais como variação em degrau do referencial de potência, curto-circuito trifásico e inserção dos bancos de capacitores.

Em uma primeira análise, sem tomar como base os resultados das referências [5] e [15], nota-se que as respostas para os diferentes eventos são estáveis e não contém sobressinais (*overshoots*). Dessa forma, pode-se dizer que o VFT executa sua função de controlar o fluxo de potência na interligação de maneira precisa e ágil.

Na Figura 4.43, resumem-se as respostas em degrau do referencial de potência para o modelo desenvolvido no ANATEM mais a observada nas referências [5] e [15]. O modelo desenvolvido no ANATEM e apresentado na Seção 4.3.2, possui as mesmas características que o exposta nas referências [5] e [15], onde por sua vez o VFT é o único equipamento de interligação entre os dois sistemas.



a)



b)

**Figura 4.43 – Sinais de Referência e de potência ativa no VFT para as situações.**

Observa-se que a resposta apresentada na Figura 4.43a (modelo desenvolvido no ANATEM para simulações dinâmicas em uma interligação assíncrona) apresenta comportamento dinâmico similar à apresentada nas Figuras 4.43b (observada em [5] e [15]). Dessa forma, pode-se dizer que o modelo representado no ANATEM está correto, dado que suas respostas para o degrau de potência são equivalentes

## 4.5 Comentários finais

Neste Capítulo foram apresentados o modelo e as simulações dinâmicas do VFT, assim como um comparativo entre o modelo proposto e as referências [5] e [15]. Observou-se que, para as diferentes situações, o modelo proposto executou sua função de controlar o fluxo de potência na interligação.

No Capítulo seguinte, o VFT será modelado para análise em transitórios eletromagnéticos, para tanto serão apresentadas simulações em diferentes configurações, no intuito de apresentar seu desempenho na interligação de sistemas elétricos. A ferramenta de auxílio que será utilizada para esta análise será o PSCAD.

# CAPÍTULO 5

## DESEMPENHO DO VFT EM REGIME DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

Este Capítulo apresenta o modelo e os resultados das simulações de transitórios eletromagnéticos que ilustram o desempenho de um VFT típico aplicado na conexão de sistemas elétricos. O modelo e as simulações foram realizados no PSCAD/EMTDC, considerando os parâmetros do equipamento instalado em Langlois [2, 5 e 15], com o sistema de controle desenvolvido neste trabalho.

### 5.1 Modelos do VFT para transitórios eletromagnéticos

A Figura 5.1 apresenta o modelo para a representação do VFT em simulações de transitórios eletromagnéticos. Diferente do exposto nos Capítulos 3 e 4, o modelo está fundamentado na própria máquina indução de rotor bobinado, estando suas equações dinâmicas já inseridas na biblioteca de modelos do PSCAD/EMTDC.

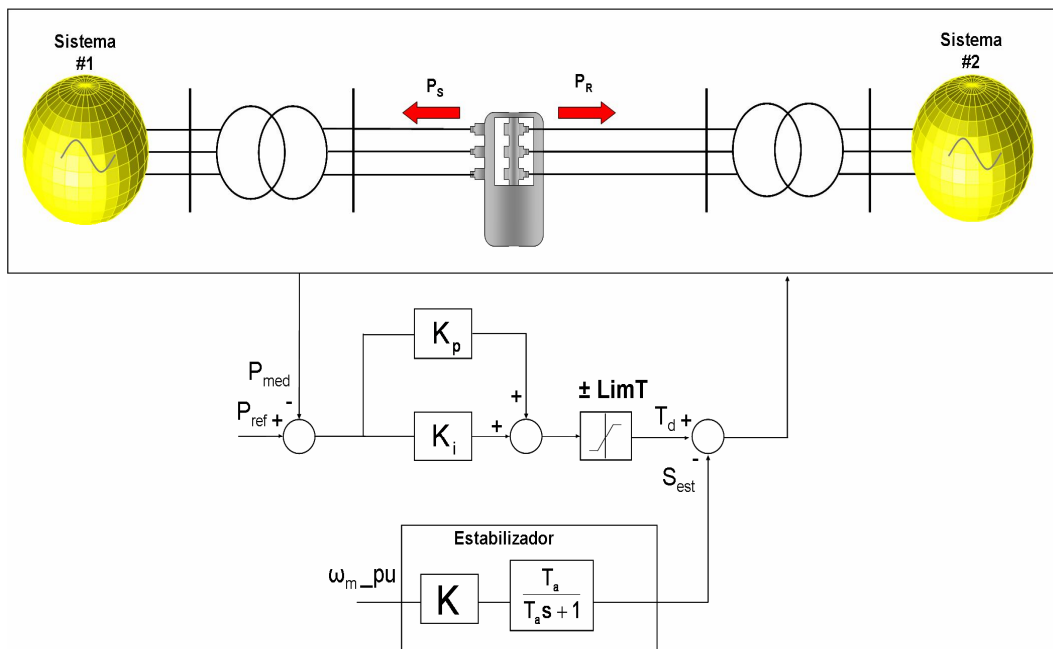


Figura 5.1 – Modelo para simulações em PSCAD/EMTDC do VFT.

Como exposto anteriormente, o modelo foi desenvolvido no PSCAD/EMTDC e considera os parâmetros do equipamento instalado em Langlois, que estão indicados na Tabela 3.

**Tabela 5 : Parâmetros do VFT para transitórios eletromagnéticos[15]**

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
Potência base do sistema	100 kV
Tensão nominal do estator	17 kV
Tensão nominal do rotor	17,5 kV
Tensão nominal das fontes equivalentes	230 kV
$X_{magVFT}$	5,6pu
$X_{VFT}$	12%
$X_{T1}$ e $X_{T2}$	10%
H - Constante de inércia do VFT	26,2s

## 5.2 Sistema de controle

Todas as explicações e comentários apresentados nas Seções 2.1.9 e 4.2 valem para esta Seção, dado que o controle é o mesmo.

## 5.3 Desempenho do VFT considerando o Modelo Desenvolvido no PSCAD/EMTDC

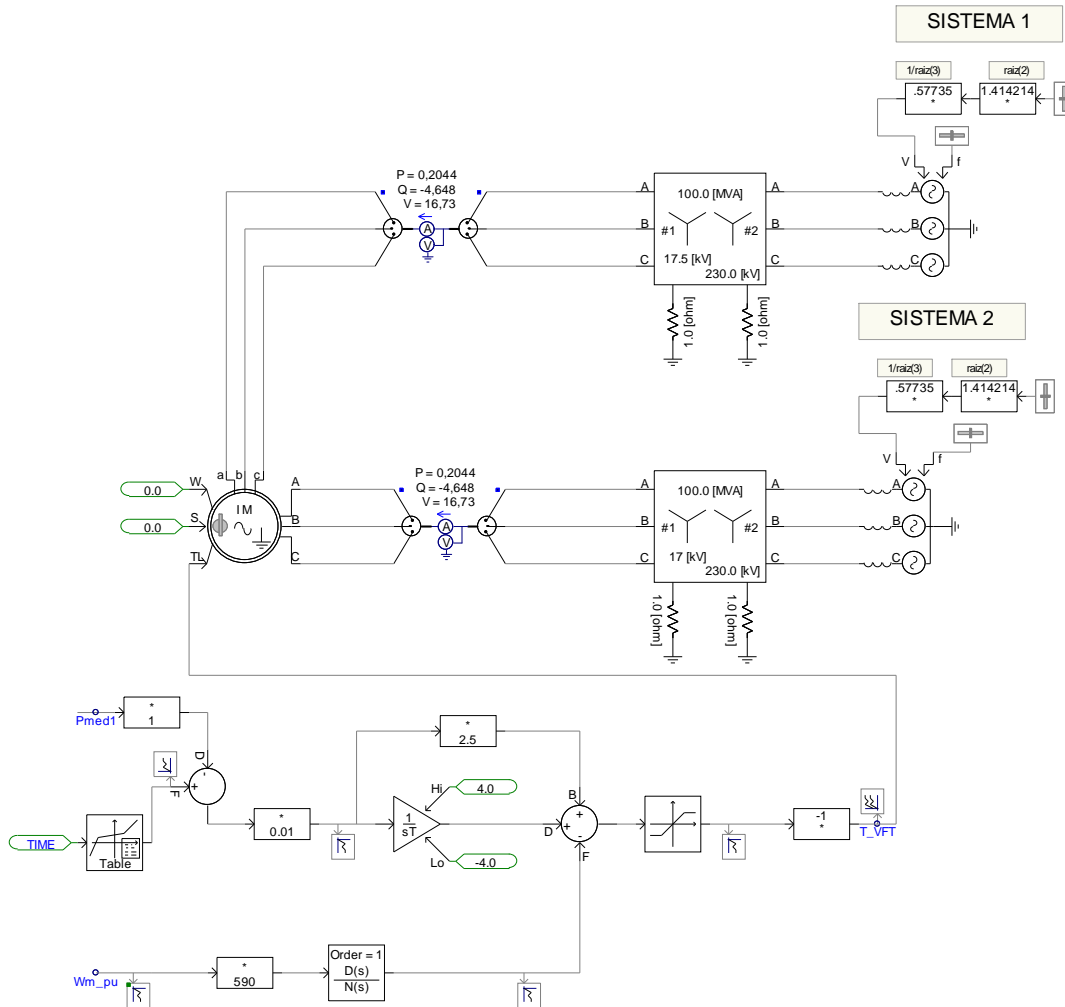
As simulações apresentadas nesta Seção consideram o VFT como único equipamento de conexão entre dois sistemas elétricos. A Figura 5.2 ilustra a configuração utilizada na análise do desempenho do VFT, quando é empregado na interligação de dois sistemas síncronos de frequências nominais iguais a 60Hz. Esta, por sua vez, está consoante com as simulações apresentadas na Seção 4.3, Figura 4.3.

O modelo utilizado para o transformador rotativo (máquina de indução duplamente alimentada) foi o *Wound Rotor Induction Machine* do PSCAD/EMTDC, na modalidade de controle de torque. Nesta condição, a entrada de torque é habilitada e a velocidade fica dependente das demais grandezas.

O torque  $T_L$  indicado na Figura 5.2 corresponde ao torque externo aplicado pelo servo motor, calculado para manter o fluxo na interligação constante em condições

normais de operação. Os detalhes do controlador do VFT estão apresentados na Seção 5.2.

Assim como as simulações apresentadas no Capítulo 4, os sistemas equivalentes conectados aos terminais do VFT foram ajustados com potência de curto-circuito de 500 MVA (sistema 1) e 1000 MVA (sistema 2), sendo estas ajustadas através de impedâncias internas das fontes.



**Figura 5.2 – Diagrama trifilar do sistema mais o controle desenvolvido para as simulações de transitórios eletromagnéticos no PSCAD/EMTDC.**

O sistema ilustrado na Figura 5.2 é usado para apresentar o desempenho do VFT desenvolvido no PSCAD/EMTDC, para respostas em degraus de potência e curto-circuito monofásico.

Estas simulações têm como objetivo complementar as análises apresentadas no Capítulo 4, dado que o evento de curto-circuito monofásico não pode ser analisado no



ANATEM, pois sua modelagem não contempla a seqüência zero. Ou seja, os eventos apresentados no Capítulo anterior são de seqüência positiva, tal como o curto-circuito trifásico.

Desta forma, serão feitas as análises para a resposta em degraus de potência no intuito de observar se o modelo desenvolvido no ANATEM possui resposta semelhante a apresentada no PSCAD/EMTDC. Um evento de curto-circuito monofásico é acrescentado ao final das simulações.

Nas próximas seções são apresentados os resultados de estudos realizados no domínio dos transitórios eletromagnéticos, que ilustram o desempenho do VFT para as diferentes condições operativas comentadas no parágrafo acima.

### **5.3.1 Simulações do VFT em Conexão Assíncronas de Mesma Frequência Nominal**

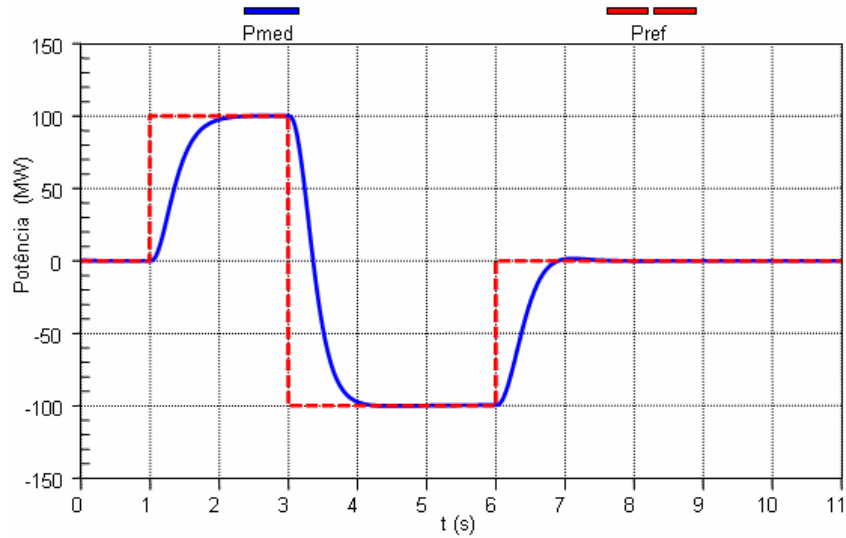
Tal como exposto anteriormente, considera-se a conexão do VFT com dois sistemas elétricos síncronos, onde o VFT é o único equipamento de conexão entre estes dois sistemas elétricos, como exposta na Figura 5.2. Os parâmetros utilizados neste controle são os mesmos dos utilizados na Seção 4.3.2, e encontram-se na Tabela 4.

#### **5.3.1.1 Caso 1: Mudança de Referência de potência, com frequência constante e sem manobra de banco de capacitores**

Os itens a seguir apresentam os principais aspectos considerados na simulação do Caso 1 de conexão síncrona:

- ✓ A simulação é realizada em uma janela de tempo de 11 segundos;
- ✓ As frequências dos sistemas equivalentes não variam no tempo;
- ✓ A simulação considera variação na potência de referência de zero para 100 MW ( $t=1s$ ), de 100 MW para -100 MW ( $t=3s$ ) e de -100 MW para 0 MW ( $t=6s$ );
- ✓ Não foram realizadas manobras em bancos de capacitores;
- ✓ Os ângulos das fontes foram ajustados para que o intercâmbio na interligação fosse inicialmente zero.

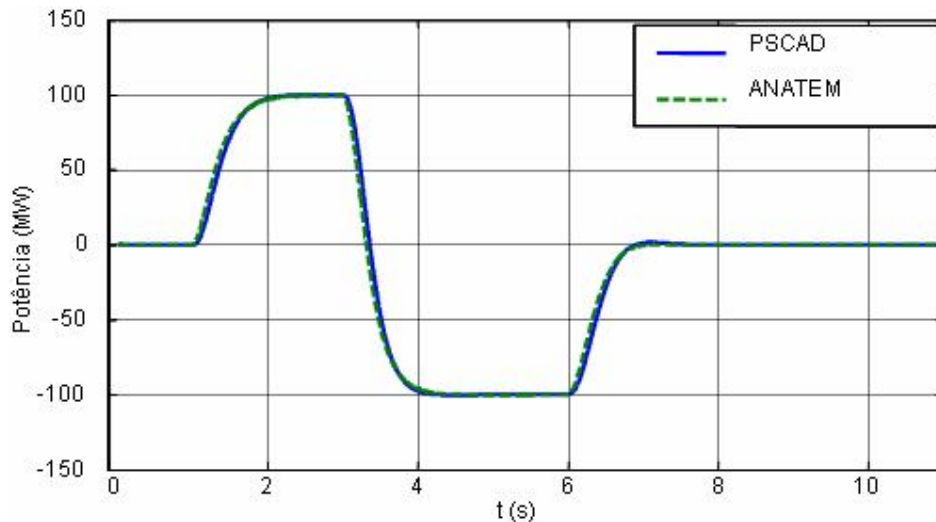
A Figura 5.3 apresenta o sinal de referência de potência para o VFT e a potência medida que flui pelo equipamento. Observa-se que o sinal de referência varia entre 100 e -100 MW, assumindo também valores nulos.



**Figura 5.3 – Sinal de referência de potência e a potência ativa no VFT (PSCAD/EMTDC).**

Na Figura 5.3, observa-se que o modelo desenvolvido no PSCAD/EMTDC para o VFT obteve desempenho adequado para as variações de potência em degrau: nota-se que, assim como o modelo apresentado no Capítulo 4, o fluxo medido segue as referências de potências.

Na Figura 5.4, as respostas para as variações em degrau foram superpostas, observa-se que para ambos os simuladores as respostas são equivalentes.



**Figura 5.4 – Comparativo entre as potências.**

A Figura 5.5 apresenta a defasagem angular imposta ao VFT pelo servo motor. Para as condições analisadas, a defasagem angular no VFT assume valores na faixa de +39,7 graus e -39,8 graus. Tais valores, correspondem, respectivamente, às transferências de 100 MW do sistema 1 para o sistema 2 e de 100 MW no sentido inverso, ou seja, do sistema 2 para o sistema 1.

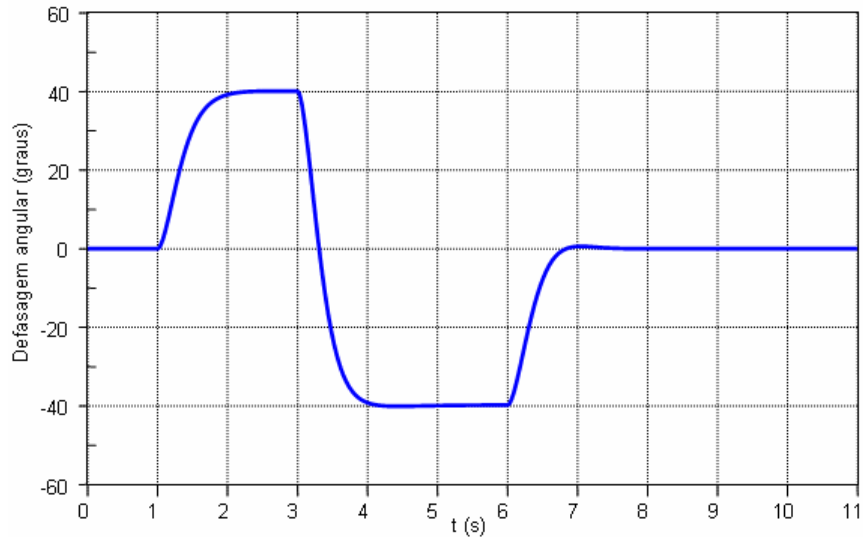


Figura 5.5 – Defasagem angular no VFT em graus (PSCAD/EMTDC).

Na Figura 5.6, estão representadas as defasagens angulares nos dois simuladores, nota-se uma pequena diferença no tempo de resposta para as variações em degrau de potência, entretanto percebe-se que são similares, pois em regime alcançam o mesmo valor.

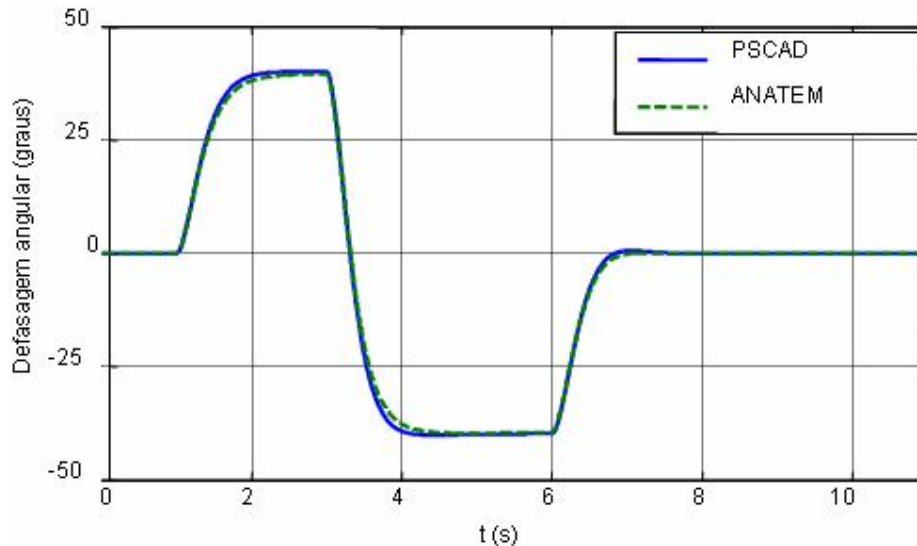
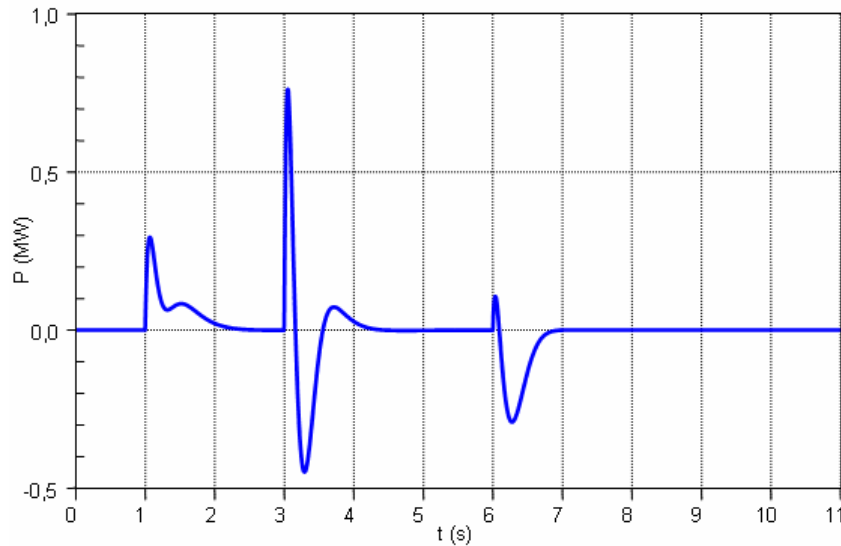


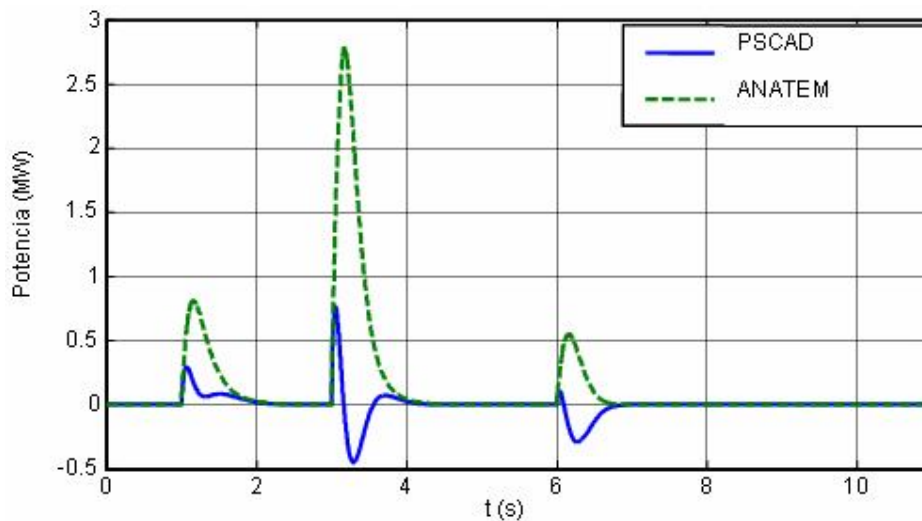
Figura 5.6 – Comparativo entre as defasagens angulares.

A Figura 5.7 apresenta a potência no servo motor. Observa-se que, na simulação, a potência mecânica assume valores máximos de aproximadamente 0,8 MW para a troca de referência de 100 MW para -100 MW.



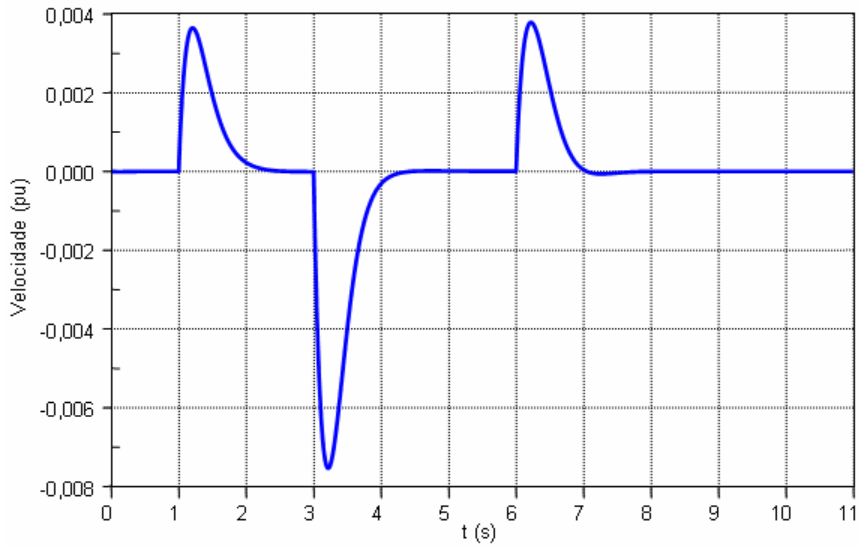
**Figura 5.7 – Potência mecânica entregue ao VFT pelo servo motor (PSCAD/EMTDC).**

Na Figura 5.8, observa-se que as potências mecânicas nos dois simuladores são diferentes. Para uma melhor análise, devem ser observadas as curvas de torque (Figura 5.12) e de velocidade (Figura 5.10) nos dois simuladores. Nota-se que os torque produzidos nos dois simuladores são diferentes, porém as velocidades são equivalentes. Como a potência mecânica é o produto entre estas duas grandezas, estas, por sua vez, serão diferentes.



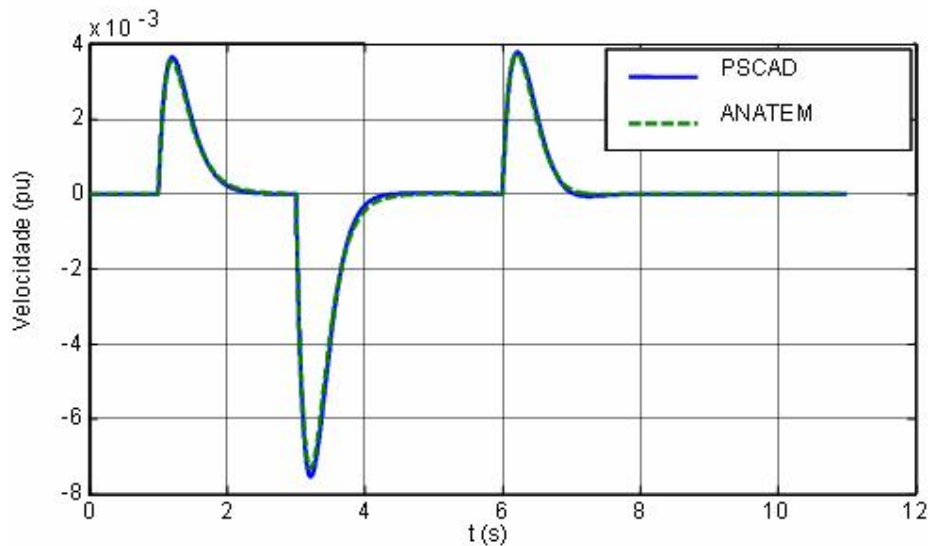
**Figura 5.8 – Comparativo entre as potências mecânicas.**

A Figura 5.9 apresenta a velocidade do rotor do VFT em pu para as condições analisadas. Observa-se que a velocidade do VFT é zero nos instantes em que o VFT transfere energia de forma estável.



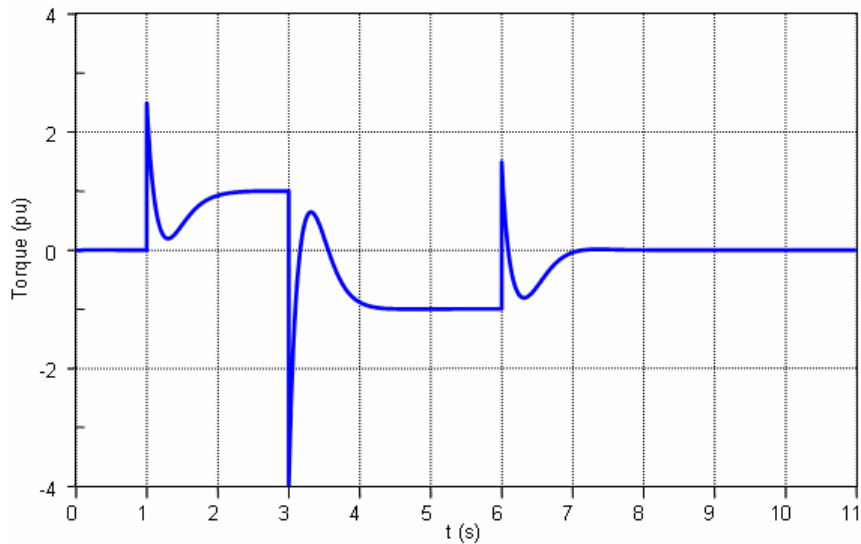
**Figura 5.9 – Velocidade do rotor do VFT em pu (PSCAD/EMTDC).**

Na Figura 5.10, as respostas para as variações em degrau foram superpostas, observa-se que para ambos os simuladores as respostas são equivalentes.



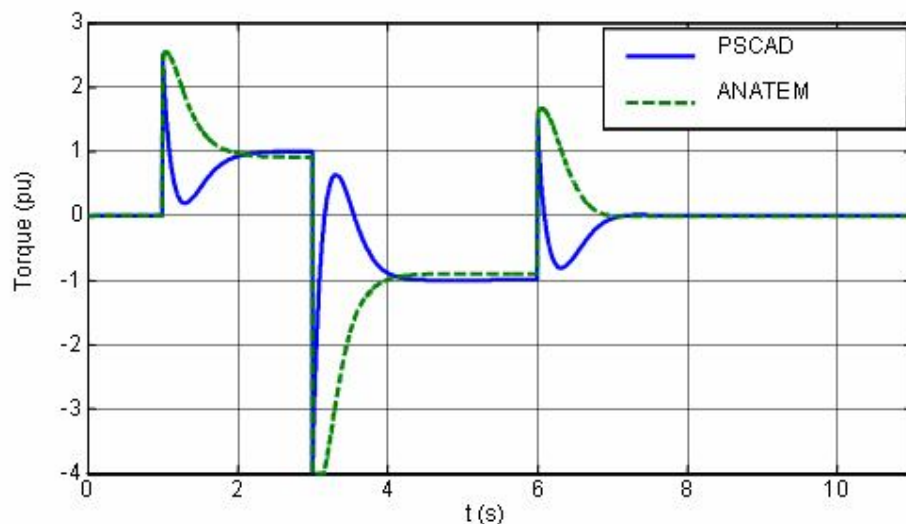
**Figura 5.10 – Comparativo entre as velocidades.**

A Figura 5.11 apresenta o torque aplicado ao eixo do VFT pelo servo motor. Para as condições analisadas, o torque assume valores entre 2,55 e - 4,0 pu.



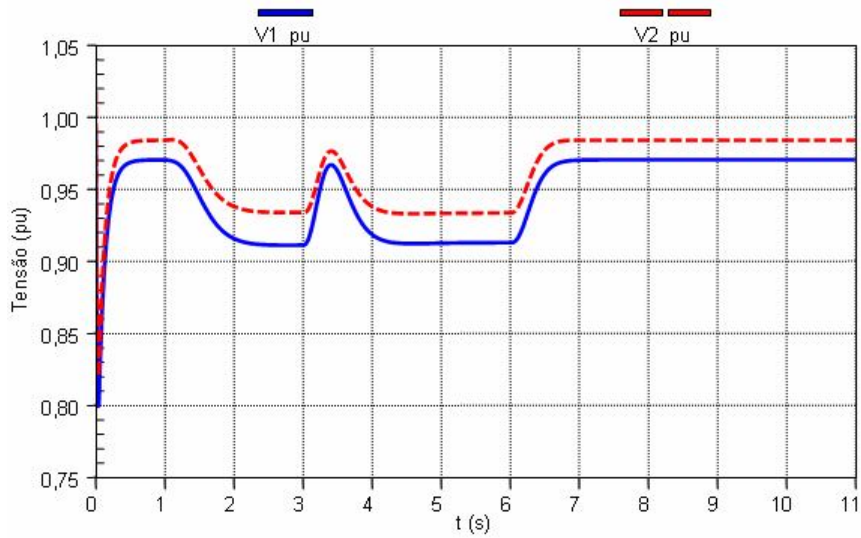
**Figura 5.11 – Torque aplicado ao eixo do VFT pelo servo motor (PSCAD/EMTDC).**

A Figura 5.12 apresenta o torque aplicado no eixo do VFT pelo sevo motor em ambos os simuladores. Observa-se que os valores de pico dos torques são iguais, porém sua forma onda são diferentes.



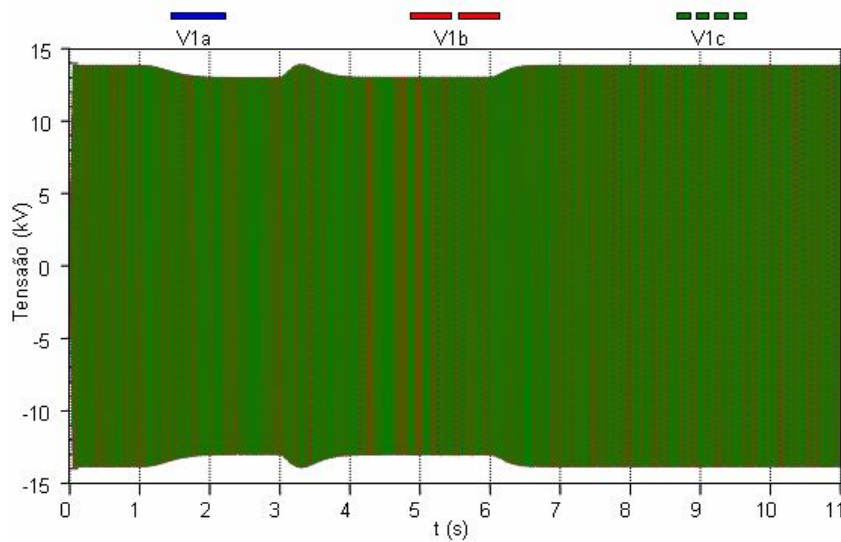
**Figura 5.12 – Comparativo entre os torques.**

A Figura 5.13 apresenta a tensão medida nos terminais do VFT. Nota-se que a variação no fluxo de potência conduz a uma variação nas tensões envolvidas. Nota-se também que, para a variação em degrau do fluxo de potência ativa que atravessa o VFT, a tensão em seus terminais excursiona entre aproximadamente 0,92 pu a 0,98 pu.



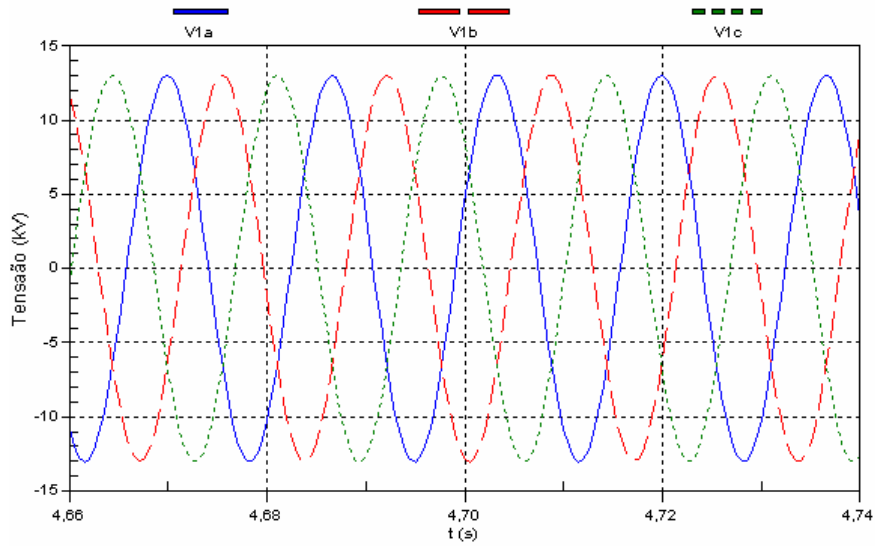
**Figura 5.13 – Tensão nos terminais do VFT (PSCAD/EMTDC).**

A Figura 5.14 apresenta a tensão nas fases a, b e c no barramento 17,5 kV do VFT ligada ao sistema 1. Assim como ilustrado na Figura 5.13, observa-se a variação da magnitude da tensão com a variação em degrau da potência.



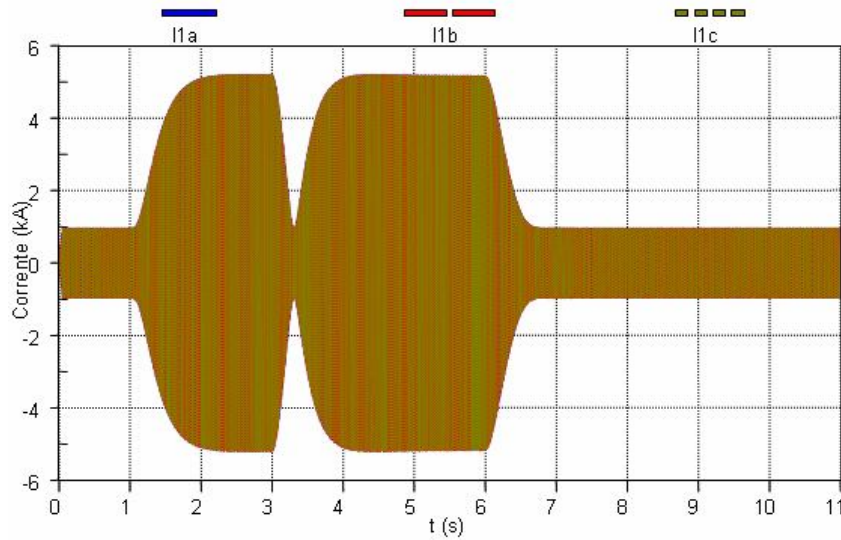
**Figura 5.14 – Envoltória da tensão instantânea nos terminais do VFT conectados ao sistema 1 (PSCAD/EMTDC).**

A Figura 5.15 também apresenta as tensão nas fases a, b e c da barra 17,5 kV ligada ao sistema 1, só que esta, por sua vez, tem como foco mostrar que as tensões para a variação em degrau da potência são equilibradas, não apresentando nenhum conteúdo harmônico.



**Figura 5.15 – Tensão instantânea nos terminais do VFT conectados ao sistema 1 (PSCAD/EMTDC).**

A Figura 5.16 ilustra o comportamento da corrente nos enrolamentos das fases a, b e c do VFT para a variação em degrau da potência. Nota-se que, para os períodos onde a potência é zero, flui corrente para a magnetização do VFT. Na figura, a corrente no rotor chega a valores da ordem de 5 kA nos períodos em que o VFT transfere o máximo de potência pela interligação (100 MW).



**Figura 5.16 – Envoltória da corrente instantânea nos terminais do VFT conectados ao sistema 1 (PSCAD/EMTDC).**



Os resultados apresentados nesta Seção são um pouco diferentes dos apresentados na Seção 4.3.2.1, em função da diferença no modelo de representação.

No ANATEM, o VFT é modelado por meio de um transformador defasador e uma reatância em paralelo, a qual é inserida com o intuito de representar a elevada reatância de magnetização. Nesta modelagem, a absorção de potência reativa não varia com a tensão de alimentação (reatância de magnetização fixa) e toda potência que entra por um lado, independente de qual seja, sai pelo outro, sem que nenhuma potência fique no eixo. Ressalta-se que isto deve ocorrer nos períodos transitórios onde há variação de frequência.

Já o modelo desenvolvido no PSCAD/EMTDC é mais real, pois o modelo do VFT é baseado na própria máquina de indução duplamente alimentada. Ou seja, a potência reativa absorvida varia com a tensão de alimentação e nos períodos transitórios, onde há variação de frequência nota-se energia absorvida pelo eixo. Apesar destes problemas, a utilização do ANATEM, embora aproximada, é indicada para estudos de situações equilibradas.

Nos parágrafos acima foram relatadas as diferenças de resultados vistas entre as seções 5.3.1.1 e 4.3.2.1, principalmente entre as respostas de torque e potência mecânica. Por outro lado, apesar dos modelos no ANATEM e no PSCAD/EMTDC serem diferentes, as respostas obtidas no PSCAD/EMTDC são bastante próximas. As diferenças são explicadas pelas restrições do modelo no ANATEM, pois não há absorção de potência para o eixo e também pela potência reativa que é tratada como uma injeção independente da tensão.

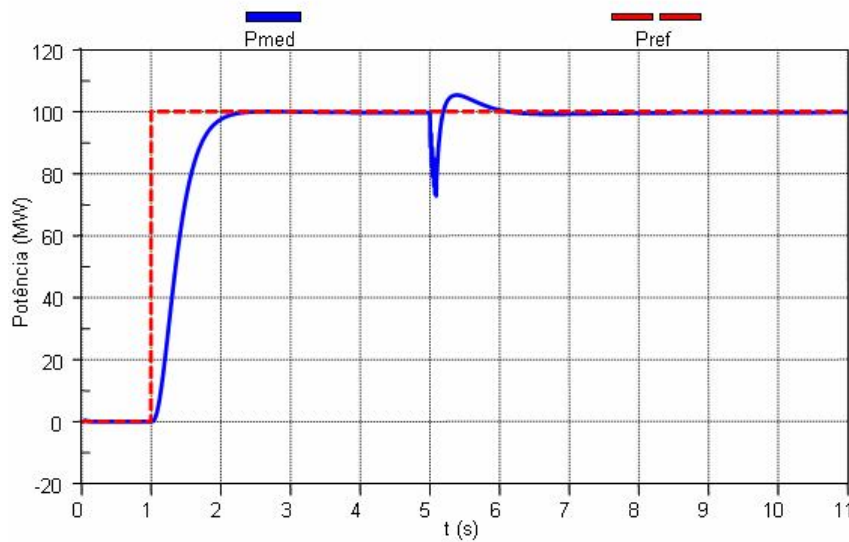
### **5.3.1.2 Caso 2: Mudança de Referência de potência e curto-circuito monofásico**

Os itens a seguir apresentam os principais aspectos considerados na simulação do Caso 5:

- ✓ Foi realizado um curto-circuito monofásico no barramento de alta do transformador que interliga o VFT ao sistema equivalente 1;
- ✓ A simulação é realizada em uma janela de tempo de 11 segundos;
- ✓ As frequências dos sistemas equivalentes não variam no tempo;

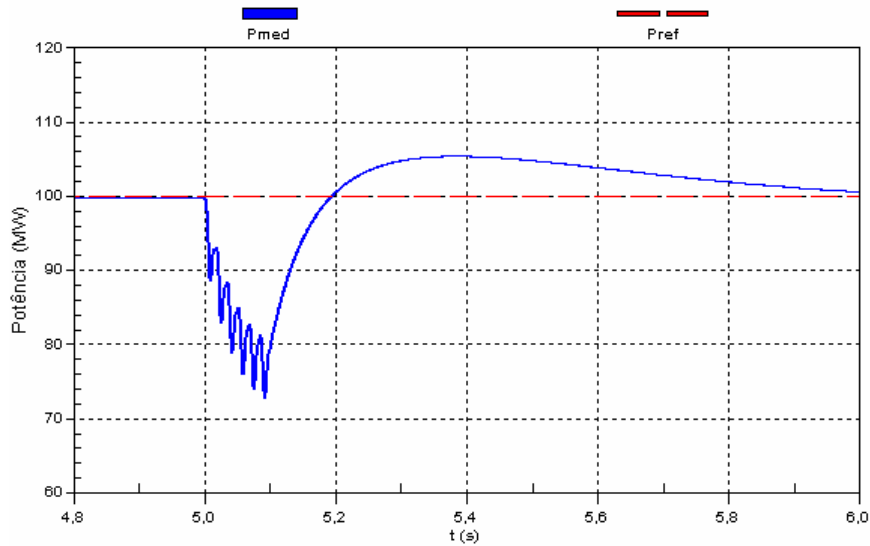
- ✓ A simulação considera variação na potência de referência de zero para 100 MW ( $t=1s$ ), curto-circuito trifásico ( $t=5s$ ) e extinção do defeito ( $t=5,1s$ );
- ✓ Não foram realizadas manobras em bancos de capacitores;
- ✓ Os ângulos das fontes foram ajustados para que o intercâmbio na interligação fosse inicialmente zero.

A Figura 5.17 apresenta o sinal de referência de potência para o VFT e a potência medida que atravessa o equipamento. Observa-se que o modelo segue a referência de potência com amortecimento satisfatório.



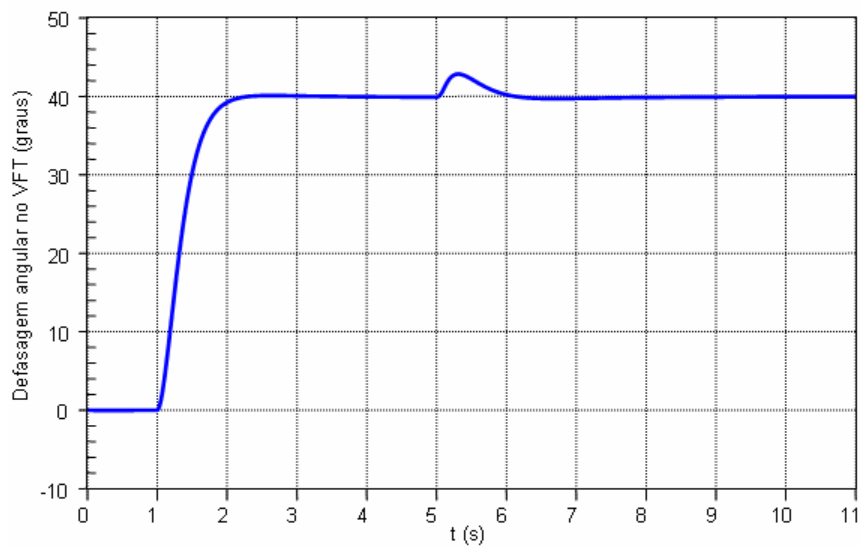
**Figura 5.17 – Sinal de referência de potência e a potência ativa no VFT.**

A Figura 5.18 mostra de forma ampliada a oscilação de potência na ocorrência do curto-circuito monofásico. Ressalta-se que este evento não poderia ser representado no ANATEM, pois o curto-circuito monofásico é um evento desequilibrado que possui sequência zero. Ou seja, as oscilações que se encontram entre os intervalos de 5,0 a 5,2 segundo não poderiam ser observadas.



**Figura 5.18 – Ampliação do sinal de referência de potência e a potência ativa no VFT no instante de curto-circuito monofásico.**

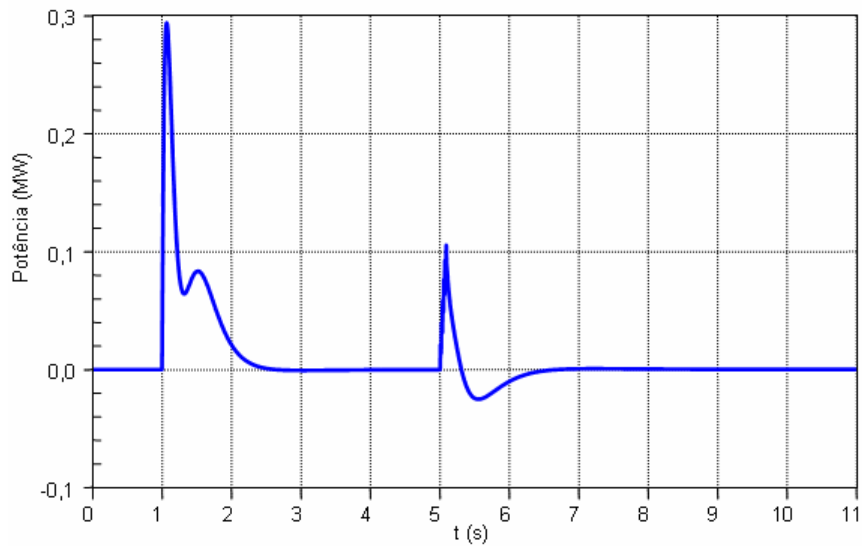
A Figura 5.19 apresenta a defasagem angular imposta ao VFT pelo servo motor. Para as condições analisadas, a defasagem angular assume valores na faixa de 0 a 42,8 graus. Observa-se que a defasagem angular imposta pelo VFT muda nos períodos de variação da referência de potência e na ocorrência do curto-circuito monofásico.



**Figura 5.19 – Defasagem angular no VFT (graus).**

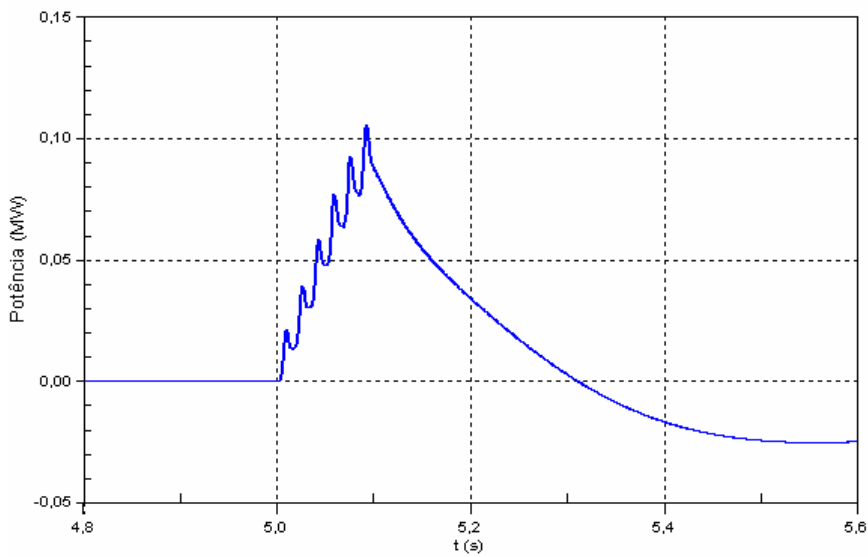
A Figura 5.20 apresenta a potência mecânica do servo motor. Observa-se que a troca de energia entre o transformador rotativo e o servo motor só acontece nos instantes em que a referência de potência é alterada e na ocorrência do evento de curto-circuito

monofásico. Na simulação, a potência mecânica assume valores máximos de aproximadamente 0,3 MW no evento de variação em degrau da potência.



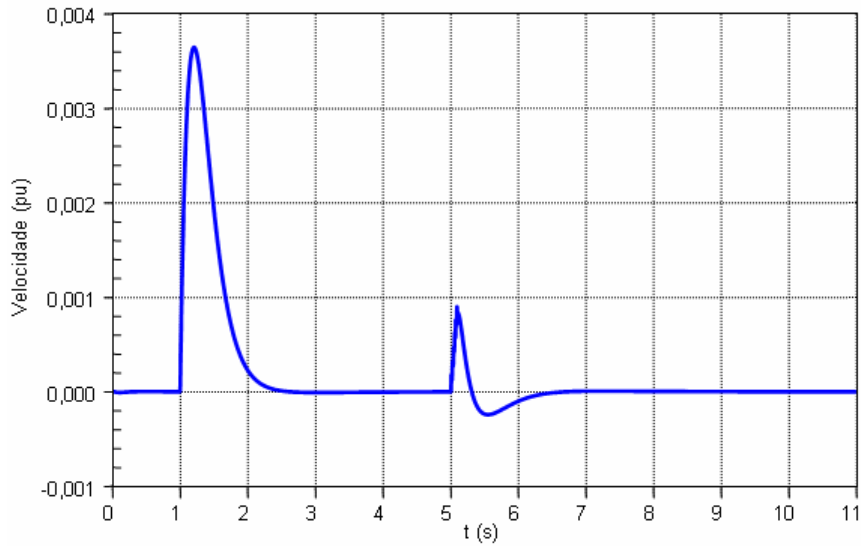
**Figura 5.20 – Potência mecânica entregue ao VFT pelo servo motor.**

A Figura 5.21 mostra de forma ampliada a variação da potência mecânica na ocorrência do curto-circuito monofásico. Observam-se pequenas oscilações, sendo estas referentes à influência da sequência zero.



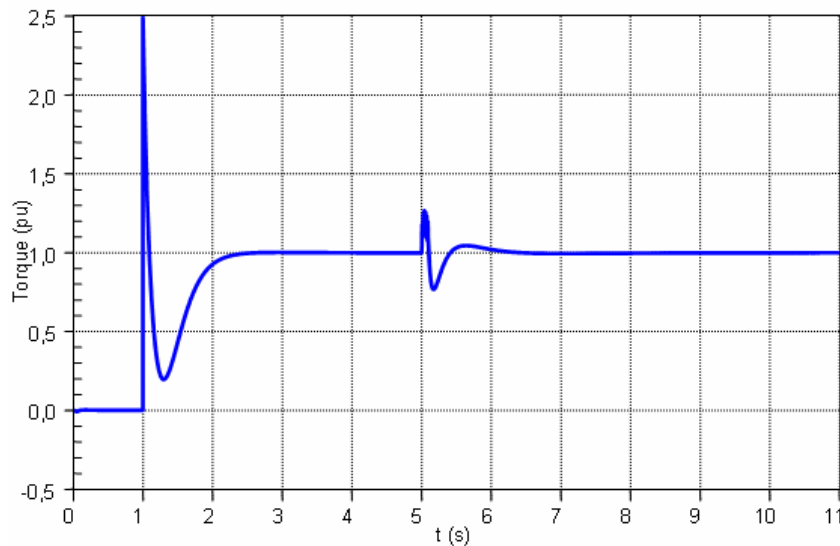
**Figura 5.21 – Ampliação do sinal de potência mecânica entregue ao VFT pelo servo motor no instante de curto-circuito monofásico.**

A Figura 5.22 apresenta a velocidade do rotor do VFT em pu para as condições analisadas. Observa-se variação na velocidade do rotor na ocorrência dos eventos de variação da referência de potência e curto-circuito trifásico.



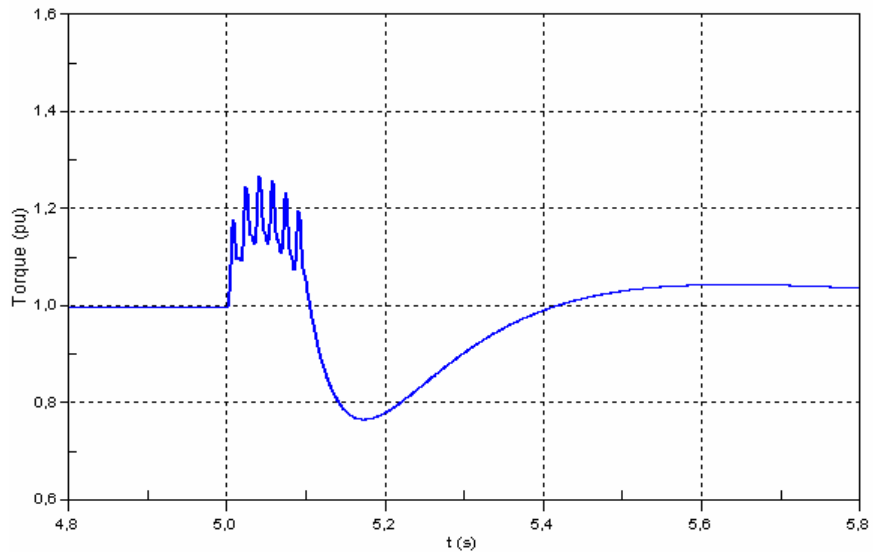
**Figura 5.22 – Velocidade do rotor do VFT em pu.**

A Figura 5.23 apresenta o torque aplicado ao eixo do VFT pelo servo motor. Para as condições analisadas, o torque assume valores entre 0,0 e + 2,50 pu. Ressalta-se que, apesar de o limitador estar representado, o sinal de torque gerado pelo controlador é inferior ao limite de 4,0 pu imposto pelo limitador.



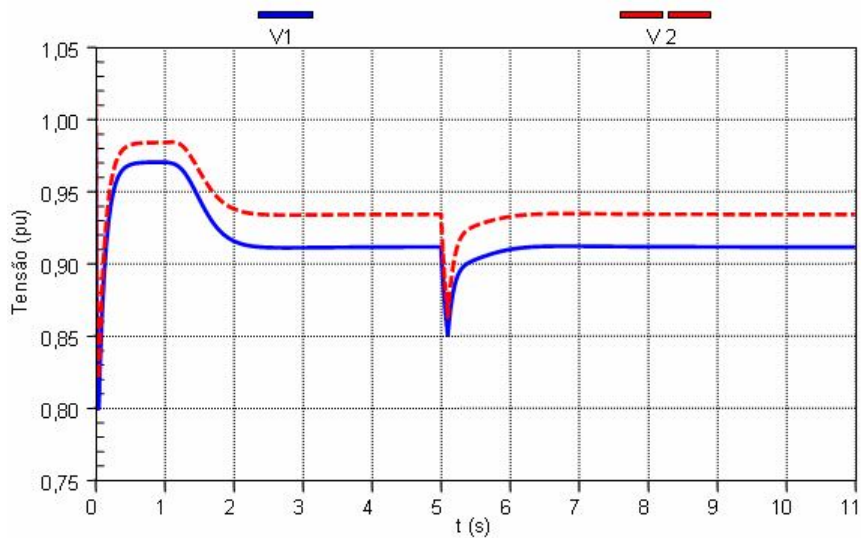
**Figura 5.23 – Torque aplicado ao eixo do VFT pelo servo motor.**

A Figura 5.24 mostra de forma ampliada, o torque aplicado no eixo do VFT no instante de ocorrência do curto-circuito monofásico. Observam-se oscilações no torque no período de ocorrência do curto-circuito. Estas oscilações de torque representam a influência da sequência zero, podem esta levar a fadiga do eixo ou até mesmo a ressonância.



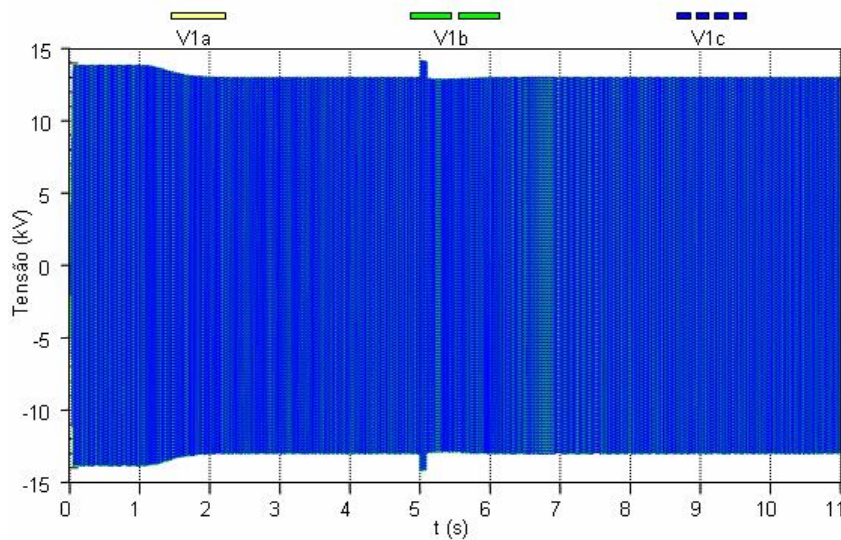
**Figura 5.24 – Ampliação do sinal torque aplicado ao eixo do VFT pelo servo motor no instante de curto-circuito monofásico.**

A Figura 5.25 apresenta a tensão nos terminais do VFT. Observa-se que a modificação do fluxo de potência e a ocorrência de curto-circuito monofásico conduziram a variações de tensão nos sistemas envolvidos.



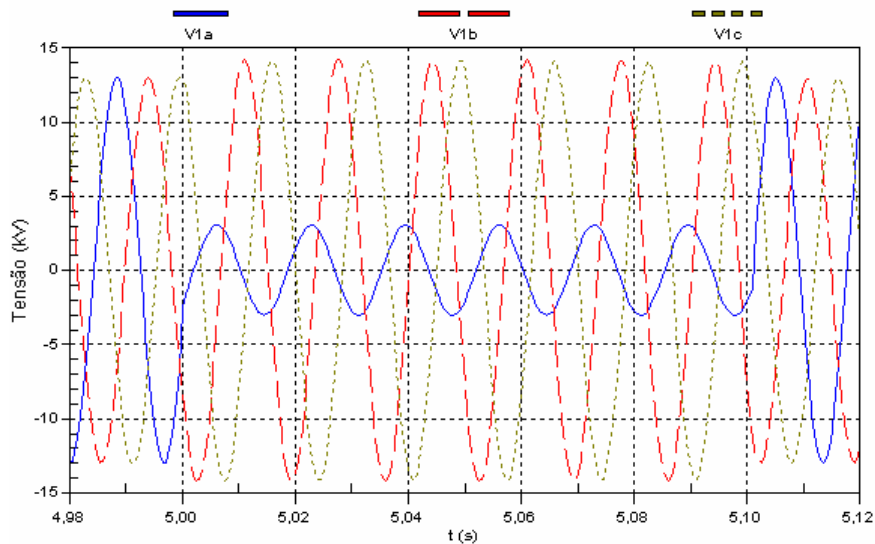
**Figura 5.25 – Tensão nos terminais do VFT.**

A Figura 5.26 apresenta as tensão nas fases a, b e c no barramento 17,5 kV do VFT ligada ao sistema 1. Assim como ilustrado na Figura 5.17, observa-se a variação da magnitude da tensão ocorre nos eventos de variação em degrau da potência e no curto-circuito monofásico.



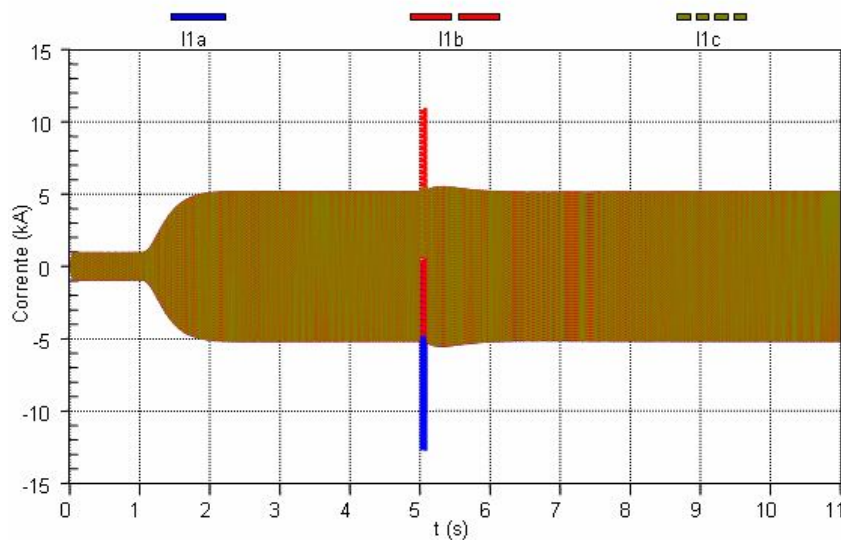
**Figura 5.26 – Envoltória da tensão instantânea nos terminais do VFT conectados ao sistema 1.**

A Figura 5.27 também apresenta as tensão nas fases a, b e c no barramento 17,5 kV do VFT ligada ao sistema 1, só que esta por sua vez tem como foco mostrar o comportamento das formas de onda da tensão para o evento de curto-circuito monofásico.



**Figura 5.27 – Tensão instantânea nos terminais do VFT conectados ao sistema 1.**

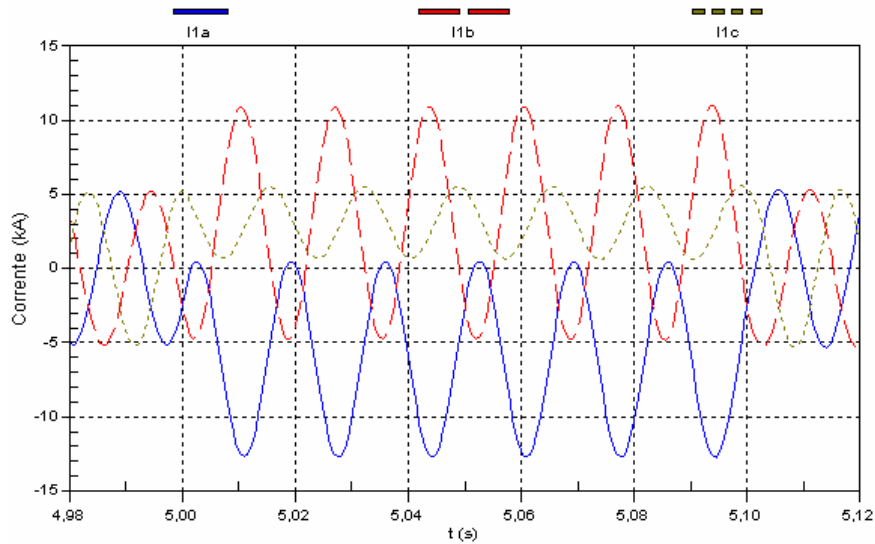
A Figura 5.28 ilustra o comportamento corrente nos enrolamentos das fases a, b e c do VFT para os eventos de variação em degrau da potência e curto-circuito monofásico. Nota-se que no período de ocorrência do curto-circuito a corrente chega a valores de pico na ordem de 12,5 kA.



**Figura 5.28 – Envoltória da corrente instantânea nos terminais do VFT conectados ao sistema 1.**

A Figura 5.29 apresenta as correntes nas fases a, b e c da barra 17,5 kV ligada ao sistema 1, só que esta tem como foco mostrar o comportamento das formas de onda da corrente durante o evento de curto-circuito monofásico.





**Figura 5.29 – Corrente instantânea nos terminais do VFT conectados ao sistema 1.**

## 5.4 Comentários finais

Neste Capítulo, foram apresentados as simulações e o modelo no domínio dos transitórios eletromagnéticos do VFT, sendo essas complementares às simulações apresentadas no Capítulo 4. Esse estudo com o PSCAD/EMTDC foi feito para validar os estudos com o ANATEM.

Dado o que foi apresentado, observou-se que o modelo apresenta comportamento compatível como o apresentado no Capítulo 4, ou seja, o modelo proposto executou sua função de controlar fluxo de potência na interligação de forma precisa e ágil.

No Capítulo seguinte, são apresentadas as principais conclusões obtidas com o desenvolvimento deste trabalho, também são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

# CAPÍTULO 6

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesse Capítulo são apresentadas e comentadas as principais conclusões obtidas com esse estudo. São sugeridas também algumas propostas para a continuidade deste trabalho.

### 6.1 Conclusões

Face aos novos empreendimentos de expansão no setor elétrico, os equipamentos que possibilitam interligar sistemas assíncronos tendem a ter um papel cada vez mais importante no cenário mundial. No entanto, interligar sistemas assíncronos constitui um grande desafio para a operação, já que as frequências e os fluxos na interligação devem ser firmemente mantidos.

Este trabalho teve como finalidade apresentar aspectos teóricos e de simulação computacional relativos à aplicação do transformador de frequência variável, conhecido como VFT, na interligação de sistemas elétricos de potência.

Em sintonia com o que foi comentado no parágrafo acima, foram apresentados os modelos e simulações para regime permanente, de transitórios eletromecânicos e transitórios eletromagnéticos do VFT, sendo estes montados com auxílio dos programas ANAREDE, ANATEM e PSCAD/EMTDC.

As simulações realizadas no decorrer dessa dissertação permitiram comprovar a viabilidade do VFT na conexão de sistemas elétricos. Em regime permanente, mostrou-se a influência da potência de curto-circuito e do controle de tensão na capacidade de transferência de energia do equipamento. Para as simulações em regime dinâmico e de transitórios eletromagnéticos propôs-se o controle de potência, o qual está baseado em um controlador PI associado uma malha adicional de estabilização. Estas por sua vez mostraram-se satisfatórias, dado que nos diferentes simuladores os modelos desempenharam seu papel de controlar o fluxo de potência de forma rápida e precisa.

Em resumo, baseado nos resultados apresentados pode-se afirmar que os modelos atendem as aplicações apresentadas, e que para as diferentes situações o VFT se mostrou uma alternativa capaz de conectar de sistemas elétricos de potência de forma controlada, ágil e precisa.

## 6.2 Trabalhos futuros

Para continuidade deste trabalho, são propostos os estudos a seguir:

- Modelar o controle do VFT em regime de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos, de forma a possibilitar que o equipamento conecte sistemas com frequências diferentes, proporcionando controle de energia na interligação de forma ágil e precisa.
- Verificar e modelar para inserção nas simulações qual servo motor melhor se empregaria para interligação de sistemas elétricos com frequência diferentes;
- Utilizar o modelo proposto para regime dinâmico em um sistema real, como por exemplo, o Sistema Elétrico Brasileiro;
- Implementar o controle contínuo do perfil de tensão nos terminais do VFT, dado que não possui meios de realizá-lo. Hoje ele é feito de forma discreta, através da inserção de bancos de capacitores. Os resultados podem ser satisfatórios para alguns casos, porém, não é possível realizar um controle contínuo da tensão da rede, o que é bastante desejável em interligações entre sistemas elétricos;
- Investigar a utilização de outra máquina como interligadora de sistemas, como por exemplo, a máquina assíncrona trifásica *Brushless* ligada em cascata e duplamente alimentada;
- Investigar para esta nova máquina o melhor servo motor para aplicação de torque no seu eixo.

# REFERÊNCIAS

- [1] M. Molinas, H. Nakamura, A. Koyanagi, R. Shimada, Analytical and Experimental Study of a Rotatory Phase Shifter for Power System Applications, IEEJ Proc. of Meeting on Power System Technology, pp. 87-92, 1999.
- [2] P. Doyon, D. McLaren, M. White, et al., Development of a 100 MW Variable Frequency Transformer, Canada Power, Toronto, Canada, September 28-30, 2004.
- [3] M. Dusseault, J-M. Gagnon, D. Galibois, et al., First VFT Application and Commissioning”, Canada Power, Toronto, Canada, September 28-30, 2004.
- [4] R. Piwko, E. Larsen, and C. Wegner, Variable Frequency Transformer - A New Alternative For Asynchronous Power Transfer, Presented at IEEE Durban, South Africa, 2005.
- [5] D. McNabb, D. Nadeau, A. Nantel, E. Pratico, E. Larsen, G. Sybille, V. Do, and D. Paré, Transient and Dynamic Modeling of the New Langlois VFT Asynchronous Tie and Validation with Commissioning Tests, IPST05-075 presented at the Int. Conf. On Power System Transients, Montreal, Canada, June 2005.
- [6] G. Chen, X. Zhou, Digital Simulation of Variable Frequency Transformers for Asynchronous Interconnection in Power System, Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2006 IEEE/PES.
- [7] R. Piwko, and E. Larsen, Variable Frequency Transformer – FACTS Technology for Asynchronous Power Transfer, presented at the IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Dallas, TX, 2005.
- [8] A. Merkhouf, S. Upadhyay, P. Doyon, Variable frequency transformer - an overview, Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE 18-22 June 2006.
- [9] P. Truman, N. Stranges, A Direct Current Torque Motor for Application on a Variable Frequency Transformer, Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE, 24-28 June 2007.
- [10] D. Nadeau, A 100-MW Variable Frequency Transformer (VFT) on the Hydro-Québec TransÉnergie Network – The Behavior during Disturbance, presented at the IEEE PES General Meeting, Tampa, FL, June 2007.
- [11] B. Bagen, D. Jacobson, G. Lane, and H. Turanli, Evaluation of the Performance of Back-to-Back HVDC Converter and Variable Frequency Transformer for Power Flow Control in a Weak Interconnection, presented at the IEEE PES General Meeting, Tampa, FL, June 2007.

- [12] E. Pratico, C. Wegner, E. Larsen, R. Piwko, D. Wallace, and D. Kidd, VFT Operational Overview – The Laredo Project, presented at the IEEE PES General Meeting, Tampa, FL, June 2007.
- [13] Merkhouf, A.; Uphadayay, S.; Doyon, P., Variable Frequency Transformer Electromagnetic Design Concept, Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE, 24-28 June 2007.
- [14] J. Marczewski, VFT Applications Between Grid Control Areas, presented at the IEEE PES General Meeting, Tampa, FL, June 2007.
- [15] E. Larsen, R. Piwko, D. McLaren, D. McNabb, M. Granger, M. Dusseault, L. Rollin, J. Primeau, Variable Frequency Transformer – A New Alternative For Asynchronous Power Transfer, presented at NATD Conference and Exposition, Toronto, Canada, May 2005.
- [16] P. Hassink, V. Beauregard, R.O’Keefe, E. Larsen, and R. Bodo, Second & Future Applications of Stability Enhancement in ERCOT with Asynchronous Interconnections, presented at the IEEE PES General Meeting, Tampa, FL, June 2007.
- [17] P. Hassink, P. Marken, R. O’Keefe, G. Trevino, “Improving Power System Dynamic Performance in Laredo, TX,” presented at IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Chicago, IL, April 2008.
- [18] J. Gagnon, D. Galibois, D. McNabb, D. Nadeau, E. Larsen, D. McLaren, R. Piwko, C. Wegner, and H. Mongeau, A 100 MW Variable Frequency Transformer (VFT) on the Hydro-Québec Network, A2-208 presented at CIGRE, Paris, France, 2006.
- [19] H. Elahi, S. Venkataraman, E. Larsen, K. Schreder, and J. Marczewski, The Linden Variable Frequency Transformer Merchant Transmission Project, C1-107 presented at CIGRE, Paris, France, August 2008.
- [20] T. Geetha, S. Jayachandran, V. Jayashankar, Network Topologies for increased renewable penetration, IPEC 2007 Singapore, Dec 2-6.
- [21] T. Geetha, V. Jayashankar, Stability Assessment of Power System Models For Higher Wind Penetration, in Proceedings of Power System Technology and IEEE Power India Conference. POWERCON. Joint International Conference, IEEE, Oct. 12-15, 2008.
- [22] Avila, M.A.Comision Fed. de Electr., Juarez, “United States and Mexico new cross-border connections”, in Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, IEEE/PES, Aug. 13-15, 2008.
- [23] N.W. Miller, K. Clark, R.J. Piwko, E.V. Larsen, GE Energy, Variable Frequency Transformer: Applications for Secure Inter-regional Power Exchange, in PowerGen Middle East. Abu Dhabi, January 2006.

- [24] J. Marczewski, VFT Interconnection Study Process with ISOs/RTOs and Grid Managers/Operators, presented at the IEEE PES General Meeting, Tampa, FL, June 2007.
- [25] P. Marken, J. Roedel, D. Nadeau, D. Wallace, and H. Mongeau, VFT Maintenance and Operating Performance, presented at the IEEE PES General Meeting, Pittsburgh, PA, July 2008.
- [26] M. H. Rashid, “Eletrônica de Potência Circuitos, Dispositivos e Aplicações”, Makron Books, 1999.
- [27] B. Adkins, “The General Theory of Electrical Machines”, Pitman, 1962.
- [28] B. K. Bose, “Power Electronics and AC Drives”, Prentice-Hall, 1986.
- [29] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley Jr, S. D. Umans, “Máquinas Elétricas”, Sexta Edição, Bookman 2006.
- [30] P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, “Analysis of Electric Machinery”, IEEE Press, 1996.
- [31] W. Leonard, “Control of Electrical Drives”, Springer Verlag 1996.
- [32] N. Mohan, M. T. Undeland, W. P. Robins, “Power Electronics”, Second edition, Editor Wiley, 1995.
- [33] J. C. P. Palma, , “Accionamentos Electromecânicos de Velocidade Variável” Edição da Fundação Calouste Gulbenkian 1999.
- [34] W.J. Jackson, “Mill motors for adjustable-speed AC drives”, IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 29, Issue 3, May-June 1993, pp. 566 – 572
- [35] V. Del Toro, “Fundamentos de máquinas elétricas”, Editora LTC, 1999.
- [36] K. Kamiyama, T. Ohmae; T. Sukegawa, “Application trends in AC motor drives” Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation, 1992. Power Electronics and Motion Control., Proceedings of the 1992 International Conference on Volume , Issue , 9-13 Nov 1992 Page(s):31 - 36 vol.1
- [37] G. L. Fischer, “Comparison of DC and AC container crane drive systems” Power Electronics and Drive Systems, 1999. PEDS '99. Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on Publication 27-29 July 1999 Volume:1 On page(s): 297 – 302 vol.1.
- [38] P. Vas, W. Drury, “Electrical machines and drives: present and future”Electrotechnical Conference, 1996. MELECON '96., 8th Mediterranean” Volume 1, 13-16 May 1996 Page(s): 67 – 74 vol.1

- [39] P.C. Sen, C.S. Namuduri, P.K. Nandam, “Evolution of control techniques for industrial drives”, Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, 1996., Proceedings of the 1996 International Conference on Volume 2, 8-11 Jan 1996.
- [40] T. Sawa, T. Kume, “Motor drive technology - history and visions for the future”, Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual Volume 1, 20-25 June 2004.
- [41] B.K. Bose, “Power Electronics and Motor Drives - Technology Advances, Trends and Applications” Industrial Technology, 2005. ICIT 2005. IEEE International Conference on 14 - 17 Dec. 2005.
- [42] M. Swamy, T. Kume, “Present state and a futuristic vision of motor drive technology” Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2008. OPTIM 2008. 11th International Conference on 22-24 May 2008.
- [43] CEPEL, Manual do Usuário ANAREDE – Programa Análise de Redes V09.04.03, Rio de Janeiro, 2008.
- [44] CEPEL, Manual do Usuário ANATEM – Análise de Transitórios Eletromecânicos V10.03.00, Rio de Janeiro, 2008.