



Ministério da Educação

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002.

Pró-Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Energia

TRANSFORMADOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL
APLICADO À GERAÇÃO HIDRELÉTRICA COM
ROTAÇÃO VARIÁVEL

FRAN WILLIAM SANTANA CARVALHO

Itajubá, Agosto de 2011.



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei n.º 10.435, de 24 de abril de 2002.

Pró-Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia

TRANSFORMADOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL
APLICADO À GERAÇÃO HIDRELÉTRICA COM
ROTAÇÃO VARIÁVEL

FRAN WILLIAM SANTANA CARVALHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Itajubá, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de mestre em Engenharia de Energia.

Área de concentração: Exploração do Uso Racional de Recursos Naturais e Energia

Orientador: Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni

Co-orientador: Prof. Dr. Ângelo José Junqueira Rezek

Itajubá, Agosto de 2011.

Dedico este trabalho à minha família que sempre me apoiou e me encorajou a buscar novos desafios e vencê-los.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni e Prof. Dr. Ângelo José Junqueira Resek, por todo apoio incondicional.

A todos os professores e amigos do Excen, pela compreensão e dedicação.

Aos monitores e funcionários do laboratório de máquinas, por toda ajuda e amizade para condução da pesquisa.

“Ciência não é decorar a página do livro texto para a prova e esquecer. É perguntar à natureza e saber escutá-la...”

Miguel Nicolelis

RESUMO

A partir de estudos foi observado que quando se tem vazão e altura de queda nas turbinas hidráulicas diferente dos valores nominais o seu rendimento decairá. Uma maneira de mitigar este problema é permitir que a rotação da turbina varie de acordo com a vazão e altura de queda, podendo assim trabalhar em um ponto ótimo para aquelas condições. Entretanto ao se variar a rotação, varia-se também a frequência do gerador elétrico que está diretamente ligado ao seu eixo, exigindo técnicas especiais de conexão à uma rede com frequência fixa.

Este trabalho explora o equipamento denominado Transformador de Frequência Variável – VFT (do inglês, Variable Frequency Transformer), que possibilita a transferência de potência elétrica entre sistemas elétricos síncronos ou assíncronos. O trabalho desenvolve uma modelagem para simulação deste equipamento, a fim de se conhecer o seu desempenho quando operando em condições estáticas e dinâmicas.

Da mesma forma, um modelo do VFT foi construído em laboratório, visando melhor compreender o seu funcionamento, estudar sistemas de controle e validar o modelo computacional desenvolvido.

Palavras chaves: Turbinas Hidráulicas, Transformador de Frequência Variável (VFT), Gerador com Frequência Variável.

ABSTRACT

Based on studies, it was observed that when you have flow and drop in hydraulic turbines different from nominal's their efficiency will decrease. One way to mitigate this problem is to allow the turbine's rotation to vary according to the flow and drop height and so working in a great point for those conditions. However, by changing the variation, we will also vary the electric generator's frequency which is directly connected to its axle requiring special connection techniques to a permanent frequency network.

This work exploits the equipment called Variable Frequency Transformer (VTF), which permits the transference of electric power between synchronous and non-synchronous electrical systems. The paper develops a modeling for this equipment's simulation in order to get to know its performance when operating under static and dynamic conditions.

The same way, a VTF model was built in laboratory, with the purpose of understanding better its operation, studying controlling systems and validating the computer model developed.

Key words: Hydraulic turbines, Variable Frequency Transformer (VTF), Variable Frequency Generator.

LISTA DE FIGURA

Figura 1.1 – VFT instalado em Langlois da Hydro-Quebec	2
Figura 2.1 – Curvas de rendimento ($\eta/\eta_{\text{MÁX}}$) em função da vazão ($Q/Q_{\eta\text{MÁX}}$) para a rotação (n_0) e altura de queda (H_0) constantes. Hélice-1, Kaplan-2, Francis rápida-3, Francis lenta-4, Pelton-5 (TENOT, 1932).....	6
Figura 2.2 – Curvas de rendimento ($\eta/\eta_{\text{imáx}}$) em função da queda (H/H_n) para as turbinas Hélice de pás fixas- 1, turbinas Hélice de pás móveis – 2, Francis rápida - 3, Francis normal – 4, Pelton - 5 e Francis lenta – 6 (TENOT, 1932)	7
Figura 2.3 – Diagrama Teórico da turbina Francis com vazão $Q_0 = 0,28 \text{ [m}^3/\text{s]}$, altura de queda $H = 12.64 \text{ [m]}$, rotação $n_0 = 1150 \text{ [rpm]}$, operando com rotação variável para a altura de queda constante de um modelo computacional entre os pontos Pf e Pa (VIANA e ALENCAR, 1999).....	8
Figura 2.4 – Rendimento total (η_t), vazão (Q) e potência de eixo (P_e) versus rotação (N), para as alturas de queda 8 [m], 10 [m] e 12 [m] (ALENCAR, 1999)	9
Figura 2.5 – Sistema de Transmissão de Corrente Contínua Convencional	11
Figura 2.6 – Sistema de Transmissão de Corrente Contínua por Conexão Unitária.....	12
Figura 2.7 – Exemplo de conexão unitária HVDC em uma Hidrelétrica (SAIDEL, 1996).....	13
Figura 2.8 – Sistema Back-to-Back.....	13
Figura 2.9 – Gerador de Indução com Dupla Alimentação.....	14
Figura 2.10 – Gerador Convencional e Gerador de Indução com Dupla Alimentação.....	15
Figura 2.11 – Transformador de Frequência Variável.....	16
Figura 2.12 – Rotor do Transformador de Frequência Variável.....	17
Figura 2.13 – Conexão de redes utilizando o VFT.....	18

Figura 2.14 – Diagrama do VFT em Quebec (GE Energy, 2009).....	19
Figura 2.15 – Ciclo Conversor em funcionamento na central de Ohkawachi com 400 [MW] de potência elétrica instalada, no Japão (GREEN, 1994).....	21
Figura 3.1 – Representação dos Componentes do VFT.....	24
Figura 3.2 – Distribuição dos enrolamentos no estator e rotor do VFT.	24
Figura 3.3 – Conexão do VFT entre os sistemas elétricos.....	25
Figura 3.4 – Equipamentos utilizados na planta do VFT.	26
Figura 3.5 – Relação entre os fasores no VFT.	29
Figura 3.6 – Fluxo de Potência no Transformador de Frequência Variável.	30
Figura 3.7 – Modelo do VFT e o ângulo de defasamento.....	33
Figura 3.8 – Circuito equivalente do VFT.....	37
Figura 4.1 – Conexão do VFT utilizando Simulink.	39
Figura 4.2 – Transferência inicial de potência em rampa com o VFT.	42
Figura 4.3 – Transferência inicial de potência em degrau no VFT.	43
Figura 4.4 – Variação da frequência em rampa sob potência constante.....	44
Figura 4.5 – Variação da frequência em degrau inferior sob potência constante.....	45
Figura 4.6 – Variação da frequência em degrau superior sob potência constante.	46
Figura 4.7 – Variação da frequência do gerador superior e inferior a síncrona.	46
Figura 4.8 – Visão geral do laboratório do VFT.	47
Figura 4.9 – Visão do conjunto das máquinas elétricas.	47
Figura 4.10 – Montagem do gerador elétrico acoplado ao motor acionador.....	48
Figura 4.11 – Ponte de tiristores e seu módulo de disparo para o motor CC do gerador.	49
Figura 4.12 – Montagem do VFT.....	50
Figura 4.13 – Montagem do condicionamento de sinais e acionamento do VFT.	50
Figura 4.14 – Autotransformador aplicado na conexão do VFT.....	51

Figura 4.15 – Placa de aquisição de dados do VFT.....	52
Figura 4.16 – Montagem do VFT para sistema conectado.....	53
Figura 4.17 – Potências ativas relacionadas ao VFT.....	55
Figura 4.18 – Dados com variação da frequência inferior do gerador.	55
Figura 4.19 – Dados com variação da frequência inferior e superior do gerador.	56
Figura 4.20 – Montagem do VFT para sistema isolado.	57
Figura 4.21 – Carga resistiva para o sistema isolado.....	57
Figura 4.22 – Sistema isolado com variação em rampa da frequência do gerador	58
Figura 4.23 – Sistema isolado com variação em degrau da potência da carga.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Campo de Aplicação das Turbinas Hidráulicas, (LUIZ, 2005).....	5
Tabela 2.2 – Condições Ótimas de Funcionamento, (ALENCAR, 1999).....	10
Tabela 2.3 – Unidades Geradoras Operando com Rotação Variável no Mundo, (GREEN, 1994).....	20
Tabela 2.4 – Unidades Geradoras Simuladas Operando com Rotação Variável no Brasil (SAIDEL, 1996)	22
Tabela 4.1 – Potências elétricas do sistema e do VFT..	54

ABREVIATURAS LATINAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCAT	Transmissão de Energia em Corrente Contínua em Alta Tensão
GE	General Electric
GIDA	Gerador de Indução com Dupla Alimentação
H	Altura
HP	Horse Power
HVDC	High Voltage Direct Current
Hz	Hertz
I, i	Corrente Elétrica
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
kW	Kilowatt
kV	Kilovolt
L	Indutância
MVA	Megavoltampere
Mvar	Megavoltampere reativo
MW	Megawatt
m ³ /s	Metro cúbico por segundo
Pe	Potência Elétrica
Q	Vazão
R	Resistência Elétrica
RMS	Root Mean Square

rpm	Rotação por minuto
T_D	Torque
V	Tensão elétrica
V _{cc}	Volts Corrente Contínua
VFT	Variable Frequency Transformer
W	Watt
X	Reatância elétrica

ABREVIATURAS GREGAS

η	Rendimento
α	Porcentagem de Abertura da Turbina
ω_{RM}	Velocidade de Rotação do rotor, em rpm
θ	Ângulo de fase
Ψ	Fluxo Magnético
λ	Fluxo Enlaçado

SUMÁRIO

Capítulo 1 INTRODUÇÃO.....	1
Capítulo 2 GERAÇÃO HIDRELÉTRICA COM VELOCIDADE VARIÁVEL	4
2.1 - Turbinas Hidráulicas.....	4
2.1.1 - Turbinas Hidráulicas Operando com Rotação Constante	5
2.1.2 - Turbinas Hidráulicas Operando com Rotação Variável	7
2.2 - Tecnologias para Conexão do Gerador com Rotação Variável.....	10
2.2.1 - Conexão Unitária	11
2.2.2 - Gerador de Indução com Dupla Alimentação.....	14
2.2.3 - Transformador de Frequência Variável	16
2.3 - Centrais Hidrelétricas com Rotação Variável no Mundo	19
Capítulo 3 TRANSFORMADOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL (VFT).....	23
3.1 - Transformador de Frequência Variável	23
3.1.1 - Transformador Rotativo Defasador	24
3.1.2 – Máquina Motora	25
3.1.3 – Rotação do VFT	26
3.1.4 – Defasamento Angular e Fluxo de Potência.	28
3.1.5 – Modelo Dinâmico do VFT.	33
Capítulo 4 AVALIAÇÃO DO VFT	38
4.1 - Simulações Teóricas do VFT.....	38

4.1.1 – Transformador Defasador.....	40
4.1.2 – Fonte de Tensão.....	40
4.1.3 – Torque Eletromagnético	40
4.1.4 – Parâmetros de Medidas	41
4.1.5 - Resultados das simulações Computacionais do VFT	41
4.2 – Montagem do VFT em Laboratório	47
4.2.1 – Gerador com Frequência Variável.	48
4.2.2 – Transformador de Frequência Variável.....	49
4.2.3 – Montagem do VFT para Transferência de Potência Conectada.....	52
4.2.4 – Montagem do VFT para Transferência de Potência Isolada.	56
Capítulo 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

O tema abordado no trabalho é o estudo do Transformador de Frequência Variável (VFT), utilizado aqui para a conexão do gerador elétrico com frequência variável (rotação variável) ao sistema elétrico nacional, permitindo assim a transferência de potência elétrica, mesmo durante distúrbios e variação de frequência. Este é apenas um método a mais que possibilita a transferência de potência entre sistemas assíncronos (que neste caso é a geração elétrica com rotação variável e a rede síncrona). Dentre outros equipamentos utilizados para tanto, pode-se citar a conexão unitária “back-to-back”, gerador de indução com dupla alimentação, aplicação de inversores de frequência e outros.

O regime hidrológico brasileiro é bem estabelecido, composto por um período úmido, caracterizado por elevados níveis de chuva, e outro período seco onde se tem baixos níveis de chuva. Com o período seco o nível da água a montante dos reservatórios das centrais hidrelétricas invariavelmente irá diminuir, acarretando em redução da queda bruta, e também a vazão disponível nas turbinas. Como as turbinas são especificadas para trabalhar a um nível de queda e vazão nominal, variações nestes parâmetros certamente resultará num decaimento de rendimento de conversão de energia destas unidades geradoras.

Com estudos realizados (Viana, Alencar, 1999) identificou-se a possibilidade de elevar o rendimento de conversão de energia, tendo como base a variação da rotação da turbina em função da sua queda e vazão, e assim trabalhar em um ponto ótimo da turbina. Desta forma, alcançar benefícios energéticos e também a redução dos custos de manutenção das turbinas, advindos da aplicação da variação da rotação hidráulica da turbina.

Além de obter benefícios ambientais com a redução da área alagada, através da operação em cotas inferiores e mantendo a mesma produção de energia de uma usina convencional, se tem benefícios energéticos com aumento da eficiência de todo o processo de geração de energia. Há também a possibilidade de postergar ou até mesmo eliminar investimentos em novas linhas de transmissão, capacitores séries, compensadores estáticos ou

outros equipamentos com o intuito de aumentar o limite de estabilidade do sistema (SPORILD, GJERDE, GJENGEDAL, 2000).

Há possibilidade da redução dos custos de manutenção e ganhos energéticos a partir da variação da rotação da turbina hidráulica, resultando na busca de uma solução para efetuar a conexão da geração com rotação variável, com conseqüente frequência variável, a um sistema com frequência fixa.

A proposta do trabalho é apresentar em detalhes o equipamento denominado Transformador de Frequência Variável - VFT (do inglês *Variable Frequency Transformer*), como uma alternativa para efetuar a conexão elétrica para transferência de potência entre os sistemas com frequências diferentes (gerador com frequência variável e a rede elétrica síncrona) e também entre sistemas síncronos.

Atualmente o VFT tem sido aplicado comercialmente à transmissão de energia entre sistemas. A figura 1.1.a apresenta um modelo desenvolvido do VFT, enquanto a figura 1.1.b mostra a aplicação real do VFT instalado na subestação de Langlois, da Hydro-Quebec, cuja operação se deu início em 2004 (AREZKI, SANJOY, PIERRE, 2006).

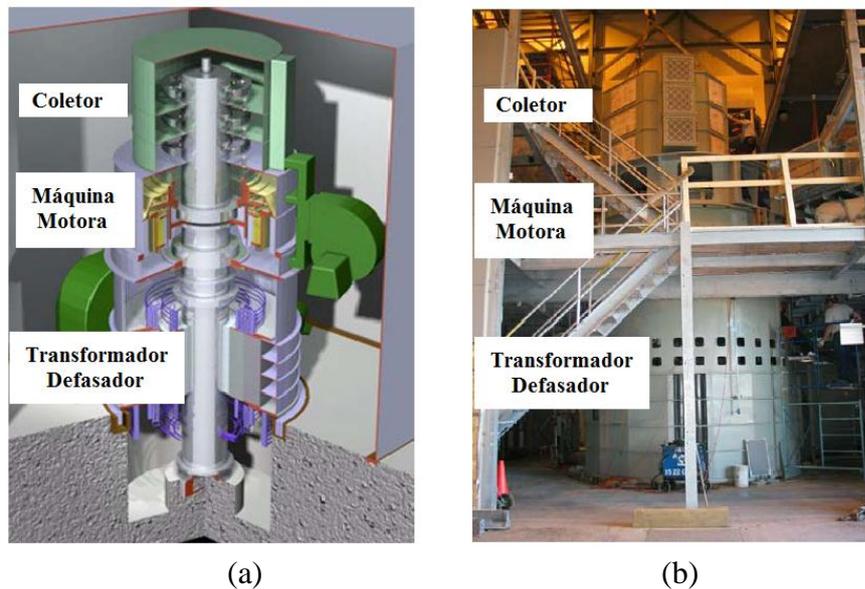


Figura 1.1 – VFT instalado em Langlois da Hydro-Quebec

No decorrer dos capítulos serão apresentados as simulações teóricas em programas computacionais específicos, e também a montagem e aquisição de dados práticos em laboratório do VFT, obtendo assim uma visão global da máquina e seu comportamento. Nas próximas secções será apresentada detalhadamente cada parte constituinte do VFT.

A dissertação apresenta o texto organizado em capítulos, que segue o conteúdo descrito a seguir.

O capítulo 2 apresenta visão do funcionamento das turbinas hidráulicas com rotação constante ou variável com suas curvas de aplicação e rendimentos. Também são mostradas as tecnologias disponíveis para conexão de sistemas elétricos com frequências assíncronas e as centrais hidrelétricas pelo mundo que funcionam com turbinas de rotação variável e uma simulação teórica das possíveis centrais hidrelétricas passíveis de ganhos energéticos com rotação variável no Brasil.

O capítulo 3 descreve os componentes do VFT, como transformador defasador (máquina de indução com rotor bobinado), máquina motora (motor de corrente contínua) e também o equacionamento que norteia a modelagem do VFT, como ângulo de fase e fluxo de potência.

O capítulo 4 apresenta resultados das simulações realizadas com o modelo computacional do VFT, bem como a instalação de um modelo em laboratório, confrontando os mesmos.

O capítulo 5 informa as conclusões pertinentes do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

GERAÇÃO HIDRELÉTRICA COM VELOCIDADE VARIÁVEL

A Matriz Elétrica Brasileira é baseada na geração de energia a partir da geração hidrelétrica, onde para aproveitamento do potencial energético utilizam-se as turbinas hidráulicas. As turbinas são projetadas e construídas para operar com velocidade de rotação mecânica em um valor fixo, isto está relacionado ao fato de manter a frequência elétrica em um valor constante, pois se deve a utilização de geradores síncronos diretamente acoplados aos eixos das turbinas.

Através da geração hidrelétrica com rotação variável, é possível obter ganhos na conversão energética, seja com uma eficiência superior da turbina, extraindo-se uma maior quantidade de energia do potencial, ou mesmo mitigando problemas mecânicos relacionados às turbinas, tais como cavitação, vibração e geração de vórtice no núcleo, diminuindo-se os custos de manutenção da máquina.

Neste capítulo será apresentada uma visão geral das turbinas hidráulicas, apresentando dados relacionados com as turbinas operando com rotação constante e com rotação variável, bem como os equipamentos utilizados para propiciar a transferência de potência elétrica entre sistemas com frequências diferentes.

2.1 - Turbinas Hidráulicas

A turbina hidráulica é o equipamento responsável pela primeira conversão de energia que ocorre em uma central hidrelétrica, que é a conversão da energia hidráulica em energia mecânica. Cada um dos diversos tipos de turbina existentes possui características que as tornam mais adequadas para uma determinada condição de altura de queda, vazão e rotação. Desta forma a escolha da turbina apropriada para um determinado aproveitamento hidráulico

será função das características desse mesmo local (LUIZ, 2005). A tabela 2.1 apresenta as faixas de rotação e de queda aplicável para cada tipo de turbina hidráulica.

Tabela 2.1 – Campo de Aplicação das Turbinas Hidráulicas, (LUIZ, 2005).

Tipo de Turbinas	Rotação r.p.m.	Altura H (m)
Pelton	1 jato	18 – 25
	2 jatos	26 – 35
	4 jatos	40 – 50
	6 jatos	72 – 90
Francis	Muito lenta	55 – 70
	Lenta	71 – 120
	Normal	121 – 200
	Rápida	201 – 300
	Extra-Rápida	301 – 450
Kaplan, Bulbo, Tubulares, Straflo	8 pás	250 – 320
	7 pás	321 – 430
	6 pás	431 – 530
	5 pás	534 – 620
	4 pás	624 e acima

No projeto as turbinas hidráulicas são concebidas para operar em uma vazão regular e altura de queda hidráulica líquida nominal, trabalhando nestes pontos tem-se o rendimento máximo da máquina, qualquer variação nestes parâmetros acarretará em uma redução do rendimento da turbina, e conseqüente declínio na conversão de energia. A variação na vazão e/ou na queda líquida de operação ocasiona outros problemas além da diminuição do rendimento, tal como vórtice de núcleo, cavitação e vibrações, que levam a desgastes prematuros da turbina hidráulica, resultando em custo superior de manutenção e um maior tempo ocioso da máquina.

2.1.1 - Turbinas Hidráulicas Operando com Rotação Constante

As turbinas hidráulicas em centrais hidrelétricas são operadas em rotação constante, isso está relacionado à frequência fixa do sistema interligado e do número de polos do gerador elétrico. Com o regime sazonal de chuva no país, invariavelmente os reservatórios

hidrelétricos resultarão na variação da vazão, e da queda líquida disponíveis em suas turbinas hidráulicas.

A figura 2.1 apresenta o comportamento do rendimento de vários tipos de turbinas, normalizados pelo rendimento máximo ($\eta_t/\eta_{t\text{máx}}$), em função da vazão da turbina normalizada, a vazão para o rendimento máximo ($Q/Q_{\eta_{t\text{máx}}}$) e operando com rotação constante e igual a (n_0), para altura constante (H_0).

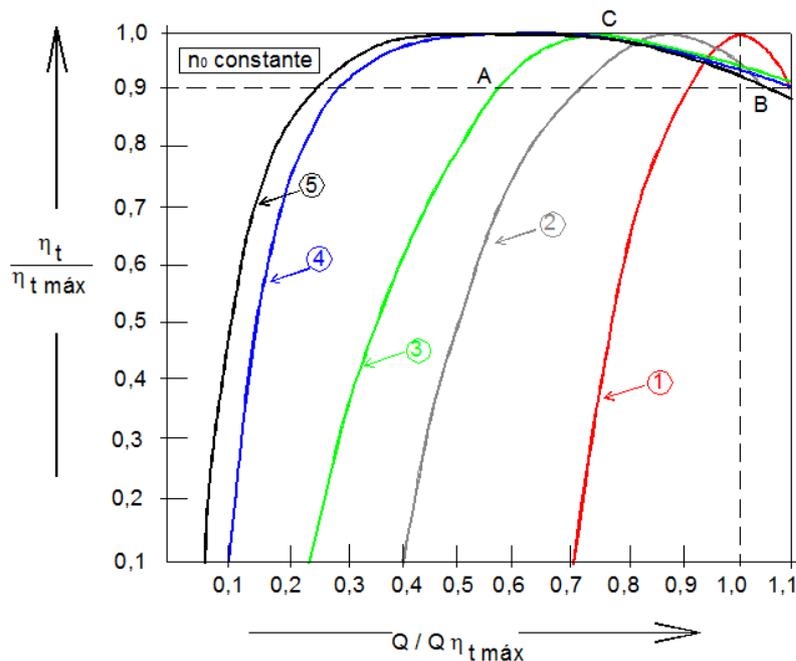


Figura 2.1 – Curvas de rendimento ($\eta_t/\eta_{t\text{máx}}$) em função da vazão ($Q/Q_{\eta_{t\text{máx}}}$) para a rotação (n_0) e altura de queda (H_0) constantes. Hélice-1, Kaplan-2, Francis rápida-3, Francis lenta-4, Pelton-5 (TENOT, 1932)

Neste caso, a turbina Hélice, que é do tipo que possui pás fixas no distribuidor e também pás fixas no rotor, opera bem apenas nas proximidades do ponto nominal. Fora dessa estreita região, o rendimento decai drasticamente. No caso das turbinas Francis, o rotor lento funciona em uma faixa maior de vazão em relação ao rápido, com pequena queda de rendimento (HARLEY, 1999).

A figura 2.2 mostra o gráfico das curvas de rendimento ($\eta_t/\eta_{t\text{máx}}$) em função da queda (H/H_n) para as turbinas Hélice, Francis lenta e rápida, Pelton, na rotação e na abertura constante e igual à nominal, onde H é a altura de queda líquida e H_n é a altura de queda

líquida no rendimento máximo. Estas curvas são muito importantes e influenciam na fixação dos níveis máximos e mínimos nos reservatórios das centrais hidrelétricas.

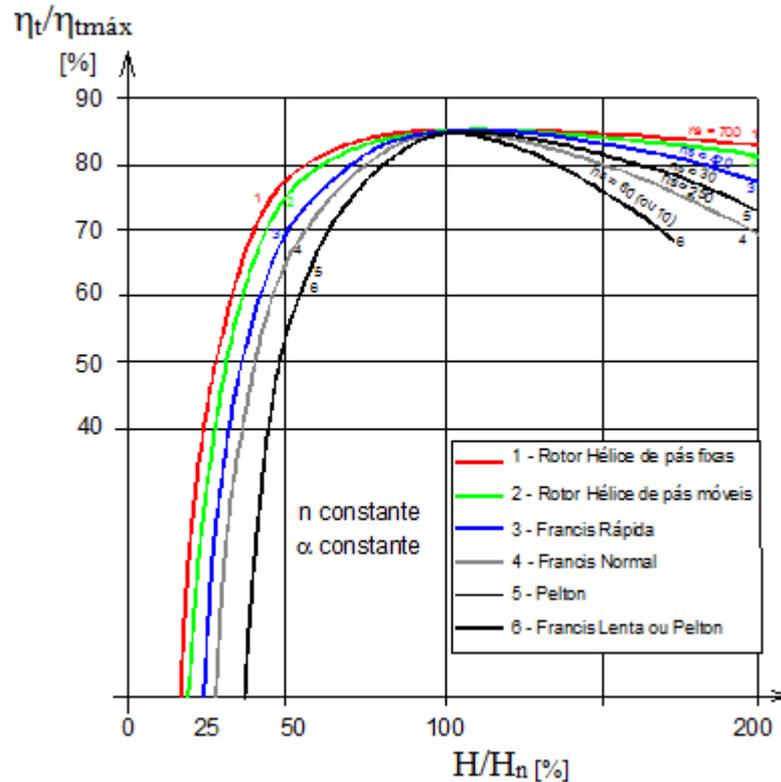


Figura 2.2 – Curvas de rendimento ($\eta_t/\eta_{tmáx}$) em função da queda (H/H_n) para as turbinas Hélice de pás fixas- 1, turbinas Hélice de pás móveis – 2, Francis rápida - 3, Francis normal –4, Pelton - 5 e Francis lenta – 6 (TENOT, 1932)

Nota-se na figura 2.2, que para uma variação de queda com rotação constante, a turbina que melhor se comporta em relação ao rendimento é a do tipo Hélice, sendo a pior a do tipo Francis lenta, posto que a turbina tipo Hélice apresenta menor variação de rendimento com relação à variação da altura de queda. Isto quer dizer que, quanto maior for a rotação específica da turbina, menor influência haverá no rendimento da mesma, quando houver uma variação de altura (HARLEY, 1999).

2.1.2 - Turbinas Hidráulicas Operando com Rotação Variável

A premissa para operação da turbina hidráulica funcionando com rotação variável, consiste em regular a rotação da turbina em função das condições operativas de um dado momento, como potência elétrica, vazão e altura de queda, visando operar a turbina no ponto

de maior rendimento possível, e conseqüentemente otimizar a operação de manutenção dos equipamentos. Para mensurar os possíveis ganhos energéticos com a rotação variável, deve-se avaliar o rendimento nas turbinas hidráulicas operando sob a condição de rotação fixa, com a possibilidade da operação com rotação variável. A figura 2.3 apresenta o “diagrama de colina” que relaciona o rendimento da turbina (η_t) em função da vazão Q (m^3/s) e da velocidade de rotação N (rpm) da mesma.

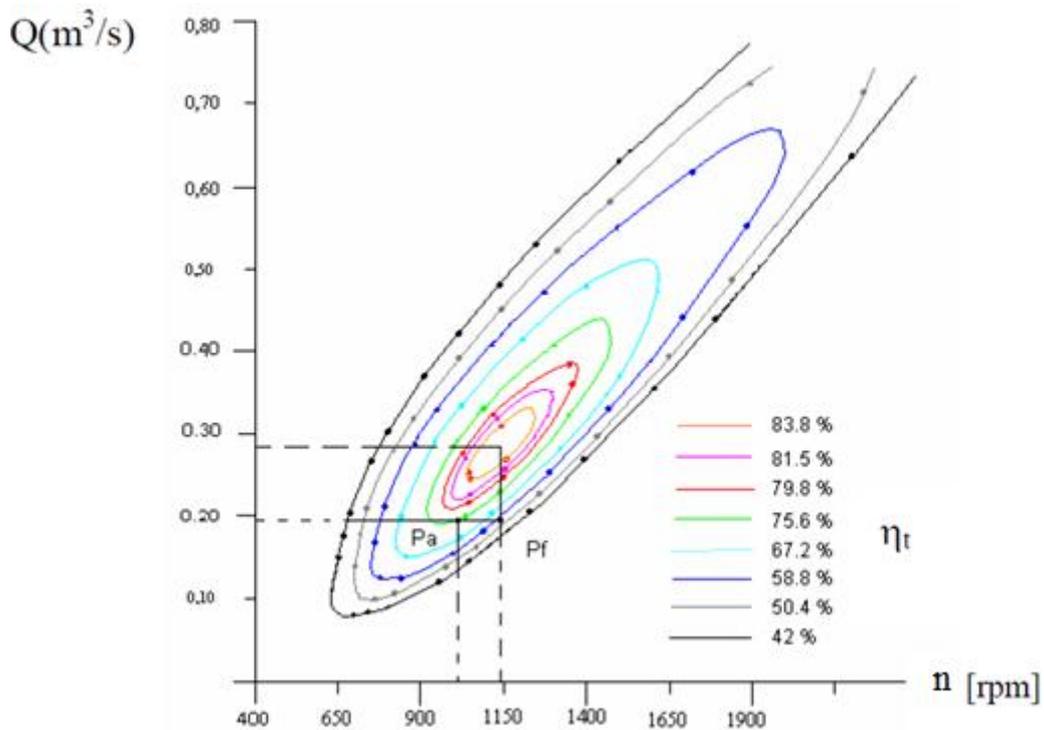


Figura 2.3 – Diagrama Teórico da turbina Francis com vazão $Q_0 = 0,28$ [m^3/s], altura de queda $H = 12,64$ [m], rotação $n_0 = 1150$ [rpm], operando com rotação variável para a altura de queda constante de um modelo computacional entre os pontos Pf e Pa (VIANA e ALENCAR, 1999).

Na figura 2.3, há dois pontos específicos, Pf e Pa. O ponto Pf é um ponto de subcarga, onde a vazão de operação é menor do que a vazão de projeto e com rotação constante de projeto, e o ponto Pa, é um ponto de subcarga, mas a rotação de operação é menor que a rotação de projeto. Observa-se que com a operação de turbinas hidráulicas tipo Francis com rotação variável e altura de queda constante, há uma compensação das perdas de energia entre a turbina e o gerador, mesmo que a turbina opere fora do seu ponto de projeto. Haverá um ganho de energia entre Pf e Pa, pois o rendimento energético na conversão é maior no Pa, e também o escoamento no interior do rotor é menos turbulento (VIANA e ALENCAR, 1999).

O ensaio prático em laboratório com o rendimento (η_t), a potência elétrica (Pe) e a vazão (Q) da turbina hidráulica em função da sua rotação, para diversas alturas de queda em uma turbina Francis é apresentado na figura 2.4 (ALENCAR, 1999).

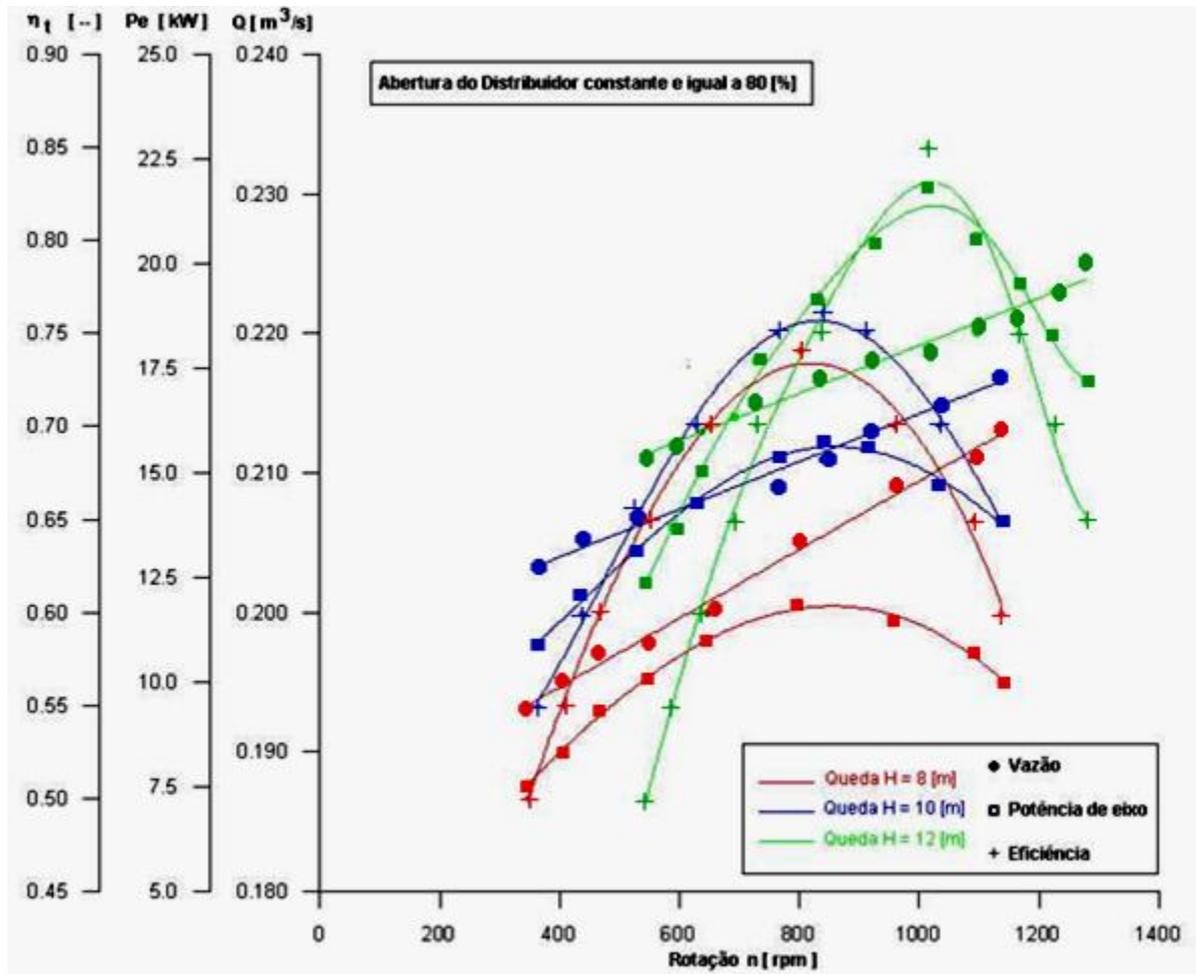


Figura 2.4 – Rendimento total (η_t), vazão (Q) e potência de eixo (Pe) versus rotação (N), para as alturas de queda 8 [m], 10 [m] e 12 [m] (ALENCAR, 1999)

A figura apresenta a simulação da variação de queda de 12, 10 e 8 metros com uma vazão hidráulica na turbina variável, os dados são relevantes para traçar o melhor campo de operação da turbina, obtendo assim uma maior eficiência de conversão.

Para os pontos ótimos de operação, em cada altura de queda que correspondem aos pontos de rotação e vazão de máximo rendimento. O rendimento maior ocorreu na altura de queda de 12 [m], pois se trata da altura de queda de projeto, considerando o intervalo de variação da rotação de 600 [rpm] para 1100 [rpm], em cada altura de queda, tem-se da figura 2.4 (ALENCAR, 1999):

a) Para altura de queda igual a 8 [m], a vazão varia de 0,199[m³/s] para 0,211[m³/s], a potência de eixo varia de 10,9[kW] para 12,1[kW] e o rendimento varia de 62,5[%] para 74,1[%];

b) Para altura de queda igual a 10 [m], a vazão varia de 0,208[m³/s] para 0,216 [m³/s], a potência de eixo varia de 13,4[kW] para 16[kW] e o rendimento varia de 67[%] para 76,1[%];

c) Para altura de queda igual a 12 [m], a vazão varia de 0,213[m³/s] para 0,223[m³/s], a potência de eixo varia de 13,8[kW] para 21,6[kW] e o rendimento varia de 57[%] para 85[%].

Pelo diagrama mostrado na figura 2.4 pode-se determinar as condições ótimas de funcionamento para cada caso, como mostra a tabela 2.2 (ALENCAR, 1999).

Tabela 2.2 – Condições Ótimas de Funcionamento, (ALENCAR, 1999)

H [m]	α [%]	n [rpm]	Q [m ³ /s]	η_t [%]	Pe [kW]
8	80	800	0,205	74,1	11,631
10	80	840	0,211	76,1	14,930
12	80	1015	0,219	85	21,613
$Pe = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_t$					

A partir dos ensaios realizados em laboratório e dos resultados obtidos do modelo computacional da turbina Francis, é possível obter ganhos de energia para condições diferentes das condições de projeto, quanto à vazão, altura de queda e rotação. Outras consequências indiretamente possíveis de serem obtidas, necessitando de trabalhos específicos para comprovação são: o aumento da vida útil da máquina, decréscimo dos custos de manutenção, minimização dos efeitos da cavitação e maior estabilidade mecânica do grupo turbina – gerador (VIANA e ALENCAR, 1999).

2.2 - Tecnologias para Conexão do Gerador com Rotação Variável

Com a possibilidade do ganho de energia, a partir da variação da rotação da turbina hidráulica nas centrais hidrelétricas, o desafio é propiciar a conexão para transferência de potência elétrica entre o gerador elétrico com frequência assíncrona ao sistema elétrico

síncrono. A conexão do gerador elétrico ao sistema elétrico pode ser obtida com a utilização de conversores elétricos de frequência. Os conversores podem estar veiculado ao rotor ou ao estator do gerador dependendo da tecnologia aplicada. A seguir é apresentado algumas tecnologias para a conexão elétrica de sistemas assíncronos, conjuntamente com o VFT utilizado neste trabalho.

2.2.1 - Conexão Unitária

O princípio básico da conexão unitária gerador-conversor consiste na utilização da máquina síncrona diretamente conectada à pontes conversoras, ou seja, utiliza o princípio de aplicação da conversão eletrônica sobre o estator da máquina (REIS, 1993).

Assim nesta configuração, o conversor de potência deve ser dimensionado para conduzir toda capacidade do gerador, o que torna a sua utilização onerosa. A utilização desta alternativa está intimamente ligada à transmissão em corrente contínua, pois é analisado em comparação ao uso do sistema convencional de transmissão de energia em corrente contínua em alta tensão - CCAT, como apresentado na figura 2.5.

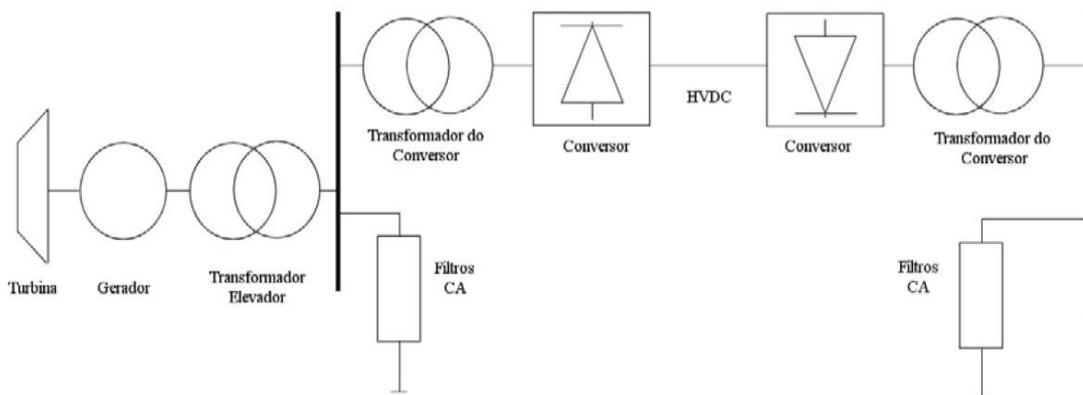


Figura 2.5 – Sistema de Transmissão de Corrente Contínua Convencional

Historicamente a conexão unitária surgiu como aplicação dedicada ao atendimento de cargas localizadas a grandes distâncias dos pontos de geração. Naturalmente, foi uma evolução dos sistemas de transmissão de corrente contínua convencionais, e, no Brasil foi objeto de vários estudos que tinham como objetivo definir a viabilidade econômica dos aproveitamentos hidráulicos existentes na região Amazônicas (REIS, 1993).

Em comparação com sistema convencional, a conexão unitária teve o barramento CA retirado, e conectando-se diretamente o conjunto turbina-gerador ao transformador conversor, permitindo a dispensa de vários equipamentos, tais como: filtros CA, elementos de chaveamento CA, dispositivos de proteção associados, transformador elevador e o disjuntor do gerador no terminal retificador.

Com isso, a conexão unitária tem a vantagem de um custo menor nos equipamentos utilizados e conjuntamente na sua instalação, em relação à transmissão convencional CCAT. O custo para sua instalação pode ficar entre 4 [%] a 10 [%] do custo total do projeto da central (SAIDEL, 1995). A figura 2.6 apresenta um diagrama esquemático da conexão unitária.

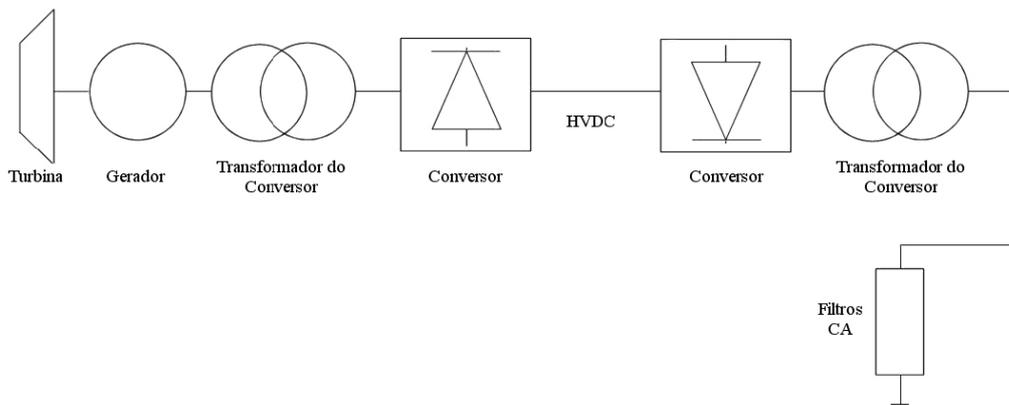


Figura 2.6 – Sistema de Transmissão de Corrente Contínua por Conexão Unitária

A figura 2.6 apresenta apenas o circuito simplificado, imposto para atender o esquema básico, para grandes aproveitamentos há necessidade de atender um grande número de unidades geradoras com um dado nível de tensão para transmissão, isto pode ocasionar arranjos mais complexos. A figura 2.7 ilustra a transmissão HVDC, constituída por tiristores e indutores de energia, aplicado para conexão de grandes sistemas elétricos, com a mesma frequência ou frequências diferentes (CAMPOS, SAIDEL, INGRAN, WESTPHALEN, 1996).

O esquema pode ser utilizado tanto para linhas de corrente contínua de longas distâncias, como para sistemas sem linha em corrente contínua. Neste caso, o esquema utilizado é conhecido como “BACK-TO-BACK”, cuja característica é a existência de retificadores e inversores localizados conjuntamente, cuja conexão à rede é realizada via linha CA.

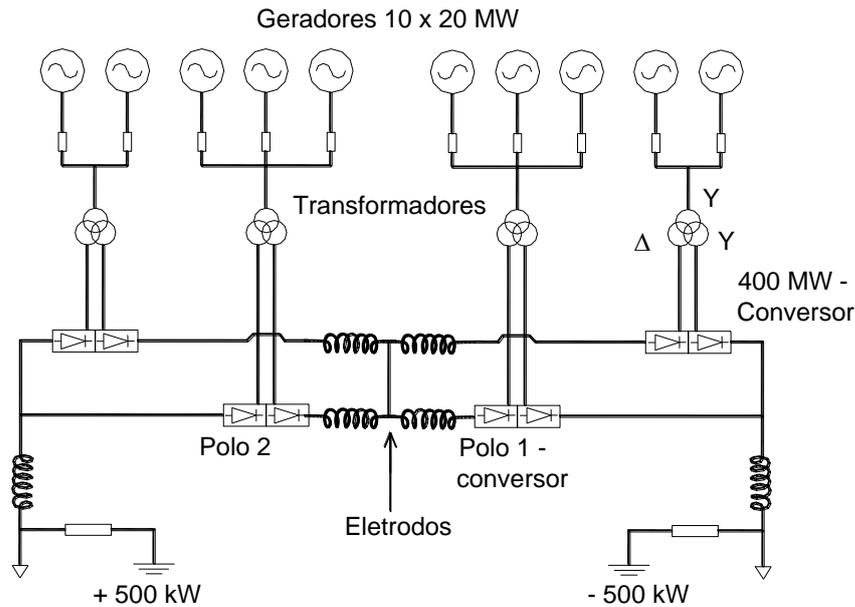


Figura 2.7 – Exemplo de conexão unitária HVDC em uma Hidrelétrica (SAIDEL, 1996)

Existem situações onde a transmissão em corrente contínua não é interessante do ponto de vista econômico. Pois para a construção ser viável em comparação com a alternativa de transmissão em corrente alternada, devem-se envolver grandes distâncias e altas potências elétricas, de forma que os custos elevados do sistema de transmissão tornem a opção economicamente viável.

Caso a conexão unitária apresente ganhos energéticos que justifiquem o investimento, o acoplamento do sistema pode ser executado em um arranjo “Back-to-Back” dentro da própria usina, mantendo a transmissão em corrente alternada e fornecendo as mesmas características da conexão unitária, como apresentado na figura 2.8 (LUIZ, 2005).

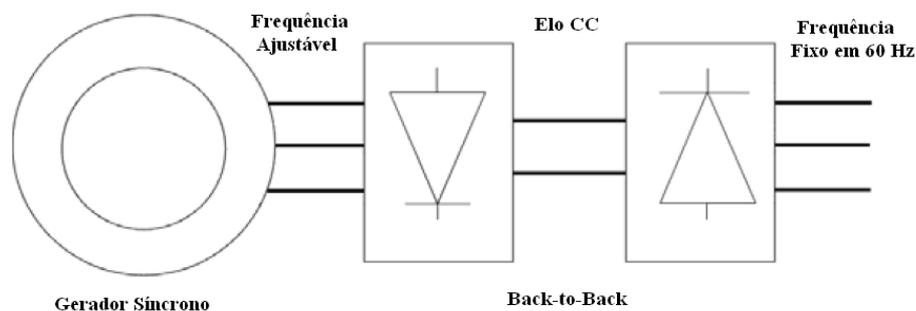


Figura 2.8 – Sistema Back-to-Back

2.2.2 - Gerador de Indução com Dupla Alimentação

O Gerador de Indução com Dupla Alimentação (GIDA) é conhecido também com o Cicloconversor, e utiliza o princípio de conexão CA que reside na utilização de máquinas de indução com rotor bobinado trifásico ao invés de máquinas síncronas convencionais. Seu princípio de operação e funcionamento baseia-se no sistema de conexão conhecido como Sherbius, no qual o estator da máquina é conectado à rede, e o rotor é alimentado por um conversor CA-CA, que possui frequência ajustável à diferença entre a rotação mecânica do rotor e a síncrona da rede (KELBER, 1997). A figura 2.9 apresenta o diagrama esquemático do GIDA.

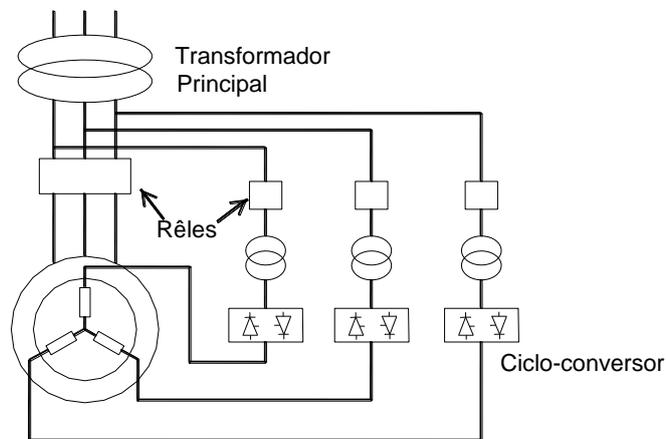


Figura 2.9 – Gerador de Indução com Dupla Alimentação.

Os enrolamentos do estator são ligados diretamente à rede, e os terminais dos enrolamentos do rotor são conectados à rede através de três conversores back-to-back IGBT Bridge, fazendo com que a alimentação do rotor seja CA. Pode-se assim ajustar a frequência elétrica da tensão do rotor, em relação à diferença da rotação mecânica do rotor com a frequência síncrona da rede, controlando conjuntamente a energia ativa e reativa da máquina (JAMAL, VENKATA, ANDREW, 2007).

Uma vantagem do GIDA em relação à conexão unitária está no dimensionamento de sua capacidade, o qual deve ser equivalente à potência de escorregamento da máquina e não da potência total. O escorregamento de máquinas de indução trifásicas é a diferença da rotação do eixo da máquina e a frequência síncrona do sistema. Por conseguinte, para operação com baixo valor de escorregamento, a potência do sistema eletrônico pode ser reduzida a 10 [%] ou 15 [%] da potência nominal da unidade geradora.

É importante ressaltar que este esquema apresenta sobrecustos no gerador, em virtude da necessidade de enrolamento trifásico no rotor, afetando também as dimensões do próprio estator. Sobre este custo, são adicionados os custos da manutenção, contribuindo para um aumento na ordem de 6 [%] a 12 [%] dos custos totais, em comparação aos custos de uma instalação de geração hidrelétrica convencional (SAIDEL, 1995).

Estruturalmente, o rotor do GIDA em relação ao rotor do gerador síncrono sofre modificações, passa a dispor de um bobinamento trifásico, e o par de anéis coletores da excitação em corrente contínua da máquina síncrona, estes passam a serem três ou seis anéis, que serão alimentados em corrente alternada. Todos os outros componentes apesar de pequenas modificações são os mesmo utilizados nas máquinas síncronas convencionais. A figura 2.10 apresenta as diferenças entre a máquina síncrona e o GIDA (JERFERSON, 2004).

Os potenciais ganhos advindos da aplicação do GIDA estão associados à regulação da rotação. Nas máquinas convencionais, quando ocorre variação da carga nos geradores, o regulador de velocidade, que é sensível a variação da rotação, atua no distribuidor a fim de aumentar ou diminuir a vazão passante, e assim ajustar a máquina às novas condições de carga. Por outro lado, utilizando o GIDA, a regulação da rotação em função da carga se faz de maneira mais rápida e eficiente (CAMPOS, SAIDEL, INGRAN, WESTPHALEN, 1996).

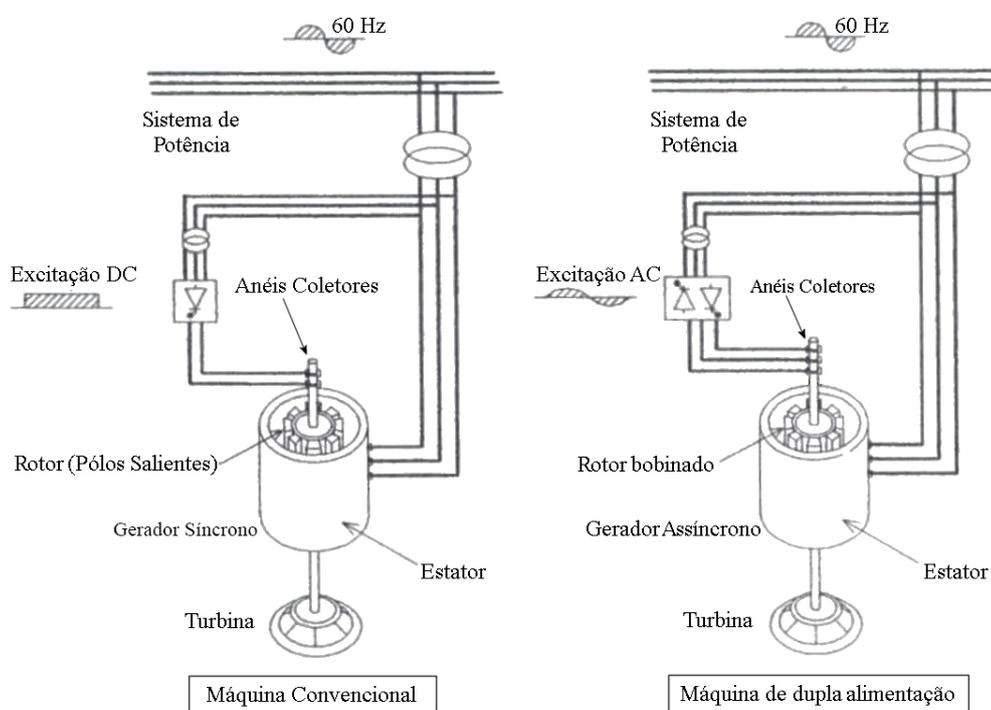


Figura 2.10 – Gerador Convencional e Gerador de Indução com Dupla Alimentação

Com a utilização de máquinas de dupla alimentação, permite-se o ajuste independente das potências ativa e reativa, atuar na capacidade de regulação de frequência e na melhoria da estabilidade dinâmica do sistema. (LUIZ, 2005).

2.2.3 - Transformador de Frequência Variável

O Transformador de Frequência Variável – VFT é essencialmente um transformador que permite uma variação contínua na mudança de fase, através de um ângulo de fase ajustável. O VFT é um transformador rotativo com três enrolamentos de fase no rotor e três enrolamentos de fase no estator, e conjuntamente uma máquina motora necessária para transferência de potência. A figura 2.11 apresenta a ilustração do VFT (LARSEN, PIWKO, MCLAREN, MCNABB, GRANGER, DUSSEAULT, ROLLIN, PRIMEAU, 2004).

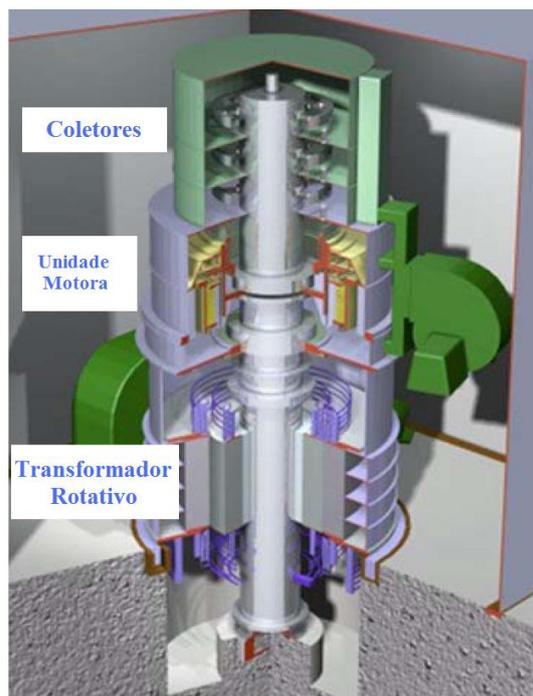


Figura 2.11 – Transformador de Frequência Variável.

A principal aplicação atualmente do VFT é a transmissão de energia entre sistemas (redes) com frequências síncronas e/ou assíncronas, sendo uma rede elétrica ligada aos terminais do rotor e a outra rede elétrica é ligada aos terminais do estator. A energia elétrica é trocada entre as redes pelo acoplamento magnético através do entreferro da máquina (AREZKI, SANJOY, PIERRE, 2006).

A transferência de potência através do VFT está lidada ao torque aplicado ao rotor, se o torque é impelido em uma direção, o fluxo de potência será dos enrolamentos do estator para os enrolamentos do rotor, caso o torque seja aplicado na direção oposta o fluxo de potência será dos enrolamentos do rotor para os enrolamentos do estator, a figura 2.12 exemplifica o rotor do VFT.

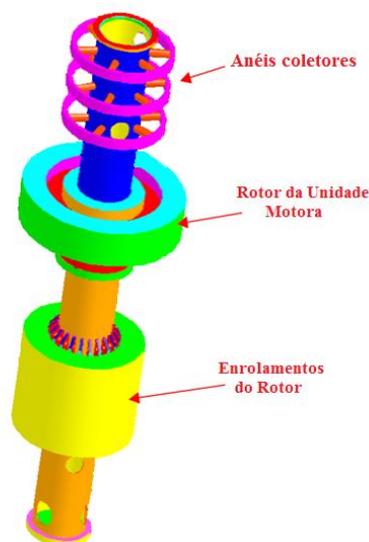


Figura 2.12 – Rotor do Transformador de Frequência Variável.

O torque no eixo do VFT é aplicado através da unidade motora, a figura 2.13 apresenta a conexão das redes ao VFT e a unidade motora com o seu sistema de controle.

Quando o VFT é utilizado para interligar duas redes de mesma frequência elétrica, a sua velocidade de rotação normal de funcionamento é igual a zero, porém a máquina motora é projetada para continuamente produzir torque, mesmo com velocidade zero. No instante que alguma das redes sofre perturbação na frequência, o VFT irá rotacionar a uma velocidade proporcional à diferença de frequência entre as duas redes (escorregamento entre as redes), durante esta operação o fluxo de potência elétrica através do VFT é mantido constante (RICHARD, EINAR, 2006).

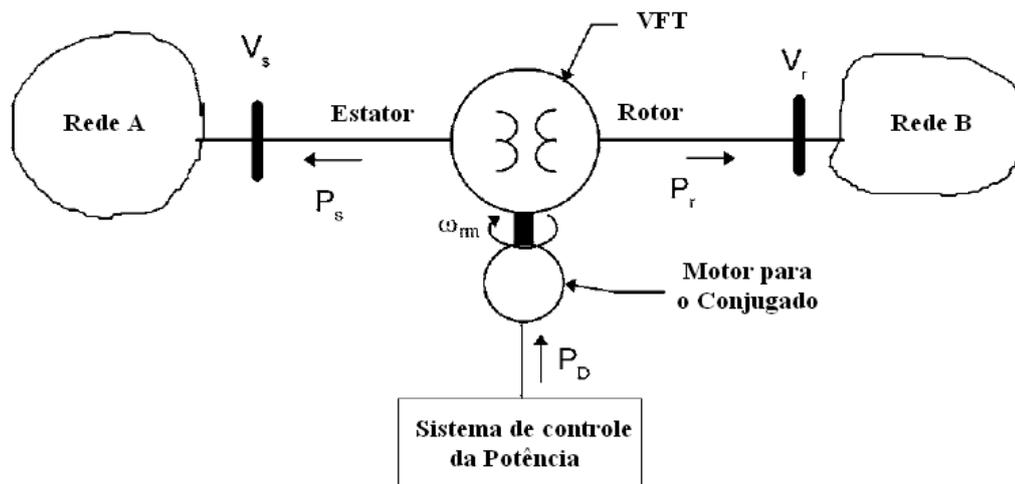


Figura 2.13 – Conexão de redes utilizando o VFT.

Como em qualquer outro transformador o VFT tem reatância que consome reativo, em função da corrente que passa por ele. Os bancos de capacitores são ligados e desligados para compensar o consumo de potência reativa do VFT e das redes adjacentes (RICHARD, EINAR, 2006).

Uma aplicação prática do VFT está sendo utilizada para efetuar a conexão elétrica das redes de Quebec (Canadá) e de Nova York (Estados Unidos). Com uma potência de 100 [MW], o VFT foi instalado na subestação de Langlois, da Hydro-Quebec, cujo o seu diagrama é mostrado na figura 2.14 (LARSEN, PIWKO, MCLAREN, MCNABB, GRANGER, DUSSEAU, ROLLIN, PRIMEAU, 2004).

Características dos VFT instalado em Quebec:

- Potência de 100 [MW], 17 [kV] o Transformador de Frequência Variável.
- Motor corrente contínua de 3000 [HP] para o VFT.
- Três bancos de capacitores paralelos de 25 [MVar].
- Dois transformadores de 120/17 [kV].

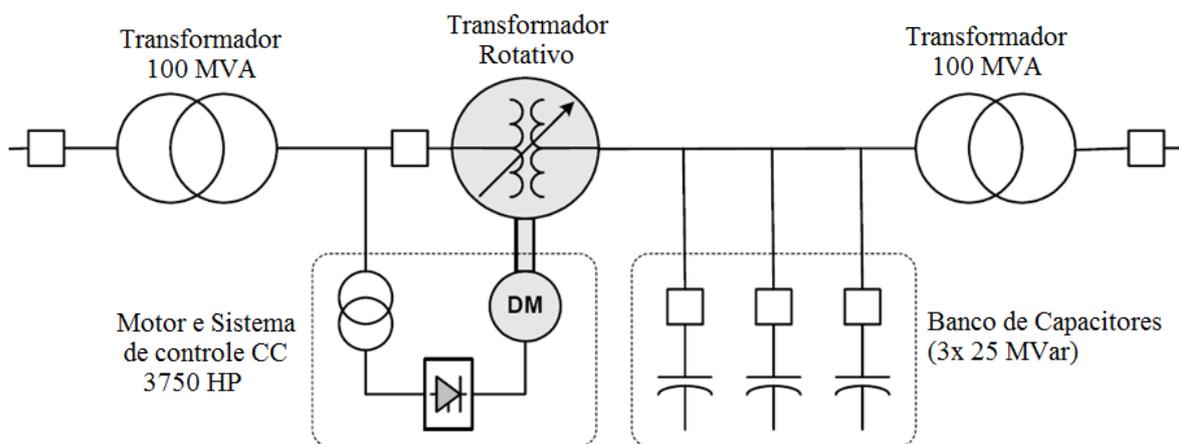


Figura 2.14 – Diagrama do VFT em Quebec (GE Energy, 2009).

O VFT é automatizado com sequência de energização para partida, funcionamento e parada. Quando comparado com outras tecnologias existentes, o VFT proporciona a capacidade de oferecer soluções de transmissão controlada, independente da rede interligada (GE ENERGY, 2009). Nos próximos capítulos será apresentado o VFT com maior clareza.

2.3 - Centrais Hidrelétricas com Rotação Variável no Mundo

Um dos empecilhos observados nos estudos para operar a turbina hidráulica com rotação variável é a conexão elétrica do gerador à rede de distribuição. Com o surgimento de novas tecnologias para conexão de sistemas elétricos assíncronos, possibilitou-se, a abrangência dos estudos e implementações práticas das turbinas com rotação variável. No mundo se tem várias usinas hidrelétricas utilizando ou implementando estudos sob a ótica da rotação variável.

Na tabela 2.3, é apresentada a distribuição das centrais hidrelétricas que operam ou estavam sendo implementadas com rotação variável. São mostrados: nome da central hidrelétrica, a companhia concessionária, a localização, a potência elétrica gerada, o número de unidades geradoras operadas com rotação variável, a tecnologia envolvida e o tipo de turbina (GREEN, 1994 e SAIDEL, 1995).

A tabela 2.3 apresenta vários tipos de turbinas hidráulicas sendo operadas com rotação variável, como turbinas reversíveis, Kaplan e Francis, possibilitando um estudo abrangente para determinar qual tipo de turbinas se adequam melhor ao trabalho com rotação variável.

Tabela 2.3 – Unidades Geradoras Operando com Rotação Variável no Mundo, (GREEN, 1994)

Nome da Central Hidrelétrica	Companhia Concessionária	Localização	Potência Elétrica Gerada [MW]	Unidades com a tecnologia	Tecnologia utilizada	Rotação variável ** [rpm]	Tipo de Turbina
Naruda	KEPC	Japão	18,5	1	Ciclo-conversor	190 - 210	TR
Yagisawa	TEPC	Japão	82	1	Ciclo-conversor	130 - 156	TR
Ohkawachi	KEPC	Japão	400	2	Ciclo-conversor	330 - 390	TR
Sabigawa *	TEPC	Japão	380	1	Ciclo-conversor	xxxxxx	xxxxxx
Okumino *	TEPC	Japão	300	1	Ciclo-conversor	xxxxxx	xxxxxx
Okukiyotsy *	TEPC	Japão	375	1	Ciclo-conversor	xxxxxx	xxxxxx
Osaka *	KEPC	Japão	500	1	Ciclo-conversor	xxxxxx	xxxxxx
Blue River	EWEB	USA	22	1	Ciclo-conversor	xxxxxx	TK
Ice Harbor *	xxxxxx	USA	xxxxxx	1	Ciclo-conversor	xxxxxx	TF
Lower Monumental *	xxxxxx	USA	xxxxxx	1	Ciclo-conversor	xxxxxx	TF
Little Goose *	xxxxxx	USA	xxxxxx	1	Ciclo-conversor	xxxxxx	xxxxxx
Lower Granite *	xxxxxx	USA	xxxxxx	1	Ciclo-conversor	xxxxxx	xxxxxx
Pan Jin Kou ***	xxxxxx	China	xxxxxx	1	Ciclo-conversor	xxxxxx	xxxxxx
Total de unidades geradoras operando com rotação variável				14			

Fonte : Green (1994)

OBSERVAÇÕES : * Unidades geradoras em fase de implantação
 ** A rotação variável indicada, corresponde a variação da rotação em relação a rotação nominal.
 *** A central de Pan Jin Lou tem sido utilizada em simulação computacional, para avaliação da aplicabilidade da rotação variável em suas unidades geradoras.

TR - Turbina Reversível
 TK - turbina tipo Kaplan
 TF - turbina tipo Francis
 KEPC - Kansai Electric Power Company
 TEPC - Tokyo Electric Power Company
 EWEB - Eugene Water and Electric Board

Da tabela 2.3, observa-se que existem mais de 10 centrais hidrelétricas de grande porte, com grupos geradores já operando com rotação variável, sendo 7 localizadas no Japão, 5 nos EUA e uma na China. Destas centrais, já se encontravam 4 em operação e 9 em processo de implantação, mostrando a importância de se trabalhar as turbinas hidráulicas com rotação variável (GREEN, 1994 e SAIDEL, 1999).

Na figura 2.15, é mostrado um Gerador de Indução com Dupla Alimentação (Ciclo-Convertor) em funcionamento, localizada na central hidrelétrica de Ohkawachi no Japão, e formada por turbinas reversíveis, com 400 [MW] de potência elétrica instalada (GREEN, 1994).

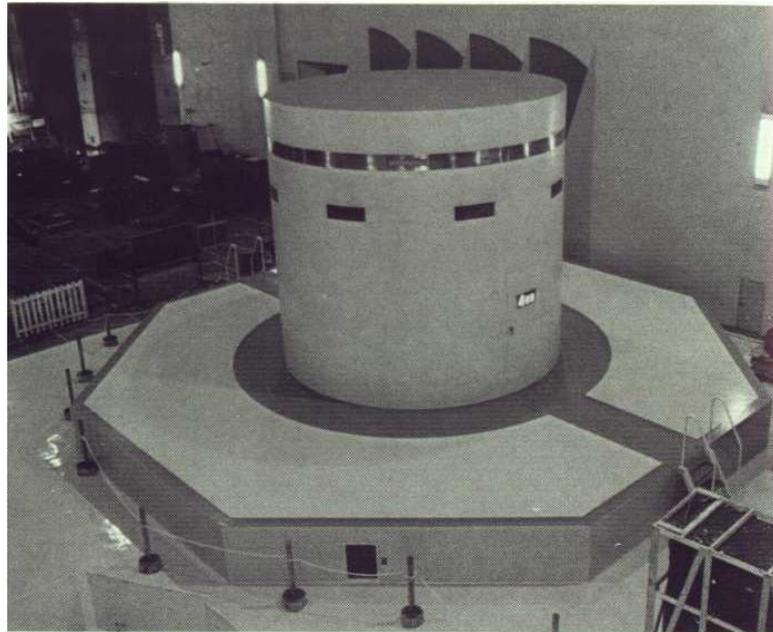


Figura 2.15 – Ciclo Conversor em funcionamento na central de Ohkawachi com 400 [MW] de potência elétrica instalada, no Japão (GREEN, 1994).

No Brasil ainda não existe uma central hidrelétrica comercial operando com rotação variável, estamos ainda no campo das simulações computacionais e análises em laboratório. Com os estudos pode-se avaliar a aplicabilidade e os ganhos advindos da operação com rotação variável.

Com base em estudos e simulações computacionais são apresentadas na tabela 2.4 algumas centrais hidrelétricas Brasileiras simuladas computacionalmente operando com rotação variável. É mostrado o nome da central, o ano de comissionamento, a potência elétrica instalada, o número de unidades geradoras simuladas para operação com rotação variável, as variações da rotação e altura de queda e o ganho de energia obtido com a rotação variável.

Tabela 2.4 – Unidades Geradoras Simuladas Operando com Rotação Variável no Brasil (SAIDEL, 1996)

Nome da Central Hidrelétrica	Ano de Comissionamento	Potência Elétrica Gerada [MW]	Unidades com a tecnologia	Tipo de Turbina	Rotação variável * [%]	Queda variável ** [%]	Ganho de Energia *** [%]
Caconde	1966	80	2	Francis	8	29,6	4,1
Cachoeira Porteira	2003	700	4	Francis	11,5	30,8	2,4
Belo Monte	2005	11000	20	Francis	2,3	6,8	0,39
José Toqni	1988	0,756	1	Bulbo	5	35,8	1,8
A. S. Oliveira	1958	32,2	2	Kaplan	5	0	0,68
Pedra do Cavalo	1999	920	6	Francis	10	11,3	4
Total de unidades geradoras simuladas operando com rotação variável				35			

Forte: Saidel (1996)

OBSERVAÇÕES : * A rotação variável indicada, corresponde ao intervalo admitido na simulação computacional em relação a rotação nominal da turbina, apresentando ganho de energia, sem sinais de cavitação;
 ** A queda variável indicada, corresponde a redução permissível da queda ao longo de um período de regularização de semanal;
 *** O ganho de energia indicado, corresponde a energia produzida, em um ano, quando a turbina opera nas condições de projeto, quanto a rotação, vazão e altura de queda nominais.

Para as simulações foram observados alguns parâmetros das centrais hidrelétricas como: o regime pluviométrico, as medições de vazões em estações hidrométricas, o nível de água do reservatório, a vazão de turbinamento, o fator de capacidade da central, a potência elétrica gerada, a potência elétrica consumida, dentre outros parâmetros (SAIDEL, 1996).

As turbinas trabalham dentro de determinados parâmetros de variação de rotação, conhecidos como campo básico de funcionamento, obtido em ensaios de modelos em laboratórios. Apesar das variações nos valores de capacidade instalada da geração de energia, todas as centrais apresentam ganhos advindos da operação com rotação variável. Assim, a simulação mostra que é viável a rotação variável, com foco no ganho de energia em um amplo campo de centrais hidrelétricas.

Capítulo 3

TRANSFORMADOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL (VFT)

O Transformador de Frequência Variável – VFT é um equipamento destinado a transmitir potência elétrica bidirecional entre sistemas elétricos, sendo com frequências elétricas síncronas ou assíncronas.

Neste capítulo serão apresentados os principais componentes e equacionamento que norteiam o VFT.

3.1 - Transformador de Frequência Variável

O VFT é constituído basicamente de dois equipamentos principais, sendo o transformador rotativo defasador e a máquina motora. A construção física do transformador rotativo é análoga a um motor assíncrono com rotor bobinado convencional, sendo ele constituído de três enrolamentos de fase no rotor e três enrolamentos de fase no estator e mutuamente semelhantes, e solidários ao seu eixo uma máquina motora responsável pelo torque, como ilustrado na figura 3.1.

O VFT é essencialmente um contínuo variador do ângulo de fase, assim possibilitando o controle do ângulo de fase e conseqüentemente a variação do fluxo de potência. O controle contínuo do ângulo de fase é obtido através do torque impelido pela máquina motora. A aplicação do VFT está na utilização como transformador defasador para a conexão elétrica com transferência de potência entre sistemas assíncronos e/ou síncronos (PIWKO, LARSEN, WEGNER, 2005).

O VFT pode parecer uma concepção nova, porém seus componentes como máquina de indução com rotor bobinado e máquina motora são bem estabelecidas em termos de estudos e aplicação.

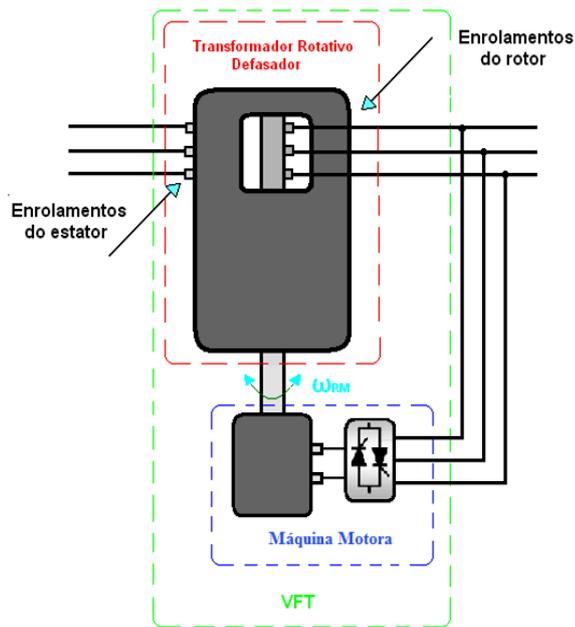


Figura 3.1 – Representação dos Componentes do VFT.

3.1.1 - Transformador Rotativo Defasador

O principal componente do VFT é o transformador rotativo, que é semelhante a uma máquina de indução com rotor bobinado. O estator do transformador rotativo é constituído de três enrolamentos isolados semelhantes e defasados 120° no espaço, e três enrolamentos isolados semelhantes e defasados 120° no espaço no rotor, os enrolamentos do rotor e estator são semelhantes entre si, como apresentado na figura 3.2.

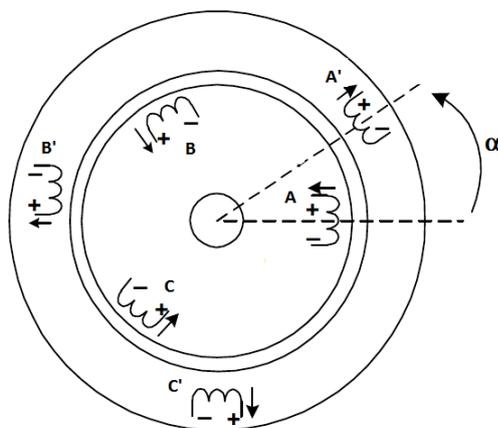


Figura 3.2 – Distribuição dos enrolamentos no estator e rotor do VFT.

O transformador rotativo é constituído de anéis coletores, que possibilita a conexão elétrica do rotor trifásico girante a um barramento de conexão externo. Aos enrolamentos do estator é conectado um sistema trifásico (gerador com rotação variável), e aos enrolamentos do rotor é ligado o outro sistema trifásico (rede elétrica) conforme ilustrado na figura 3.3, pode-se também permutar a conexão do rotor e do estator (ARJAN, 2009).

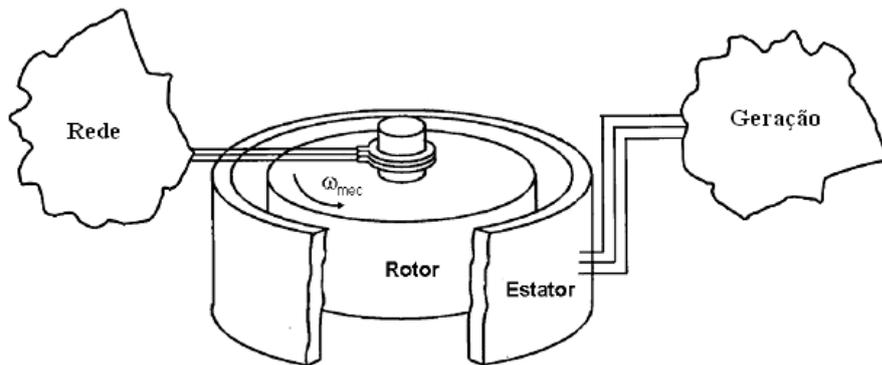


Figura 3.3 – Conexão do VFT entre os sistemas elétricos.

Quando o VFT é utilizado para interligar redes de frequências assíncronas, o transformador defasador irá rotacionar proporcionalmente ao escorregamento da frequência entre as redes, caso seja frequências síncronas não será necessário rotacionar, porém deve-se ter aplicação de torque em seu eixo (AREZKI, SANJOY, PIERRE, 2006).

3.1.2 – Máquina Motora

Como a transferência de potência através VFT está diretamente ligada ao ângulo de defasamento entre o estator e o rotor do transformador rotativo, é necessário à utilização de uma máquina motora para proporcionar o torque ao rotor do transformador defasador, como ilustrado na figura 3.4. O sentido de rotação da máquina motora determinar a direção do fluxo de potência, já o torque determina a quantidade de potência elétrica transmitida através do VFT.

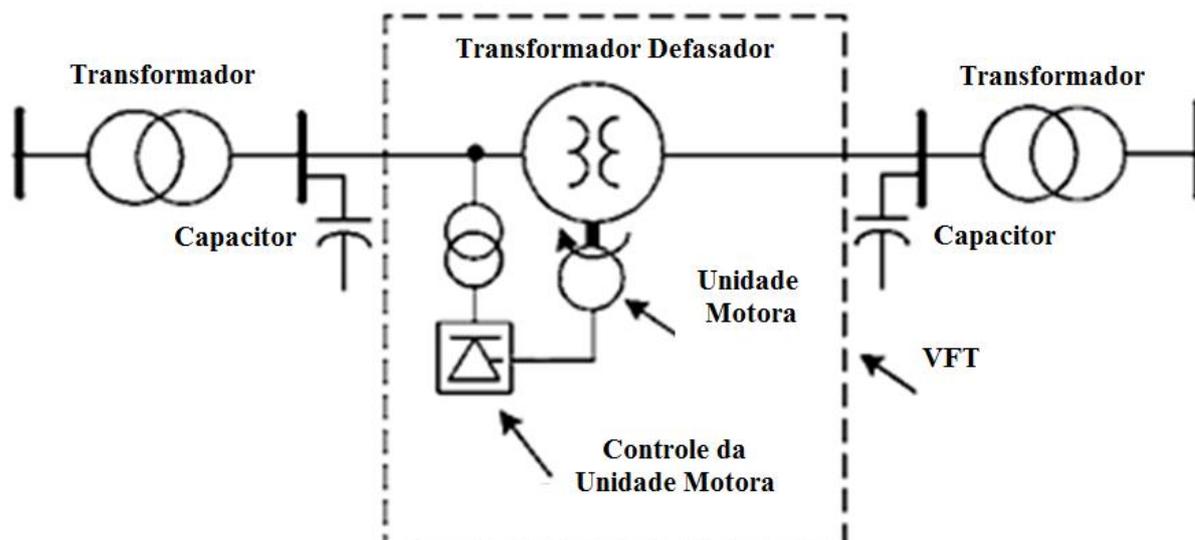


Figura 3.4 – Equipamentos utilizados na planta do VFT.

A máquina motriz recomendada é a capaz de impelir torque em baixa ou zero rotação, e com controle da variação da velocidade. Na literatura se tem o motor de corrente contínua sendo o mais citado para aplicação, pois tem um controle fino da velocidade com elevado torque em seu eixo (ARJAN, 2009).

3.1.3 – Rotação do VFT

Quando o VFT é utilizado para conexão de sistemas elétricos com frequências assíncronas, o rotor do transformador rotativo terá de rotacionar proporcionalmente ao escorregamento entre as frequências envolvidas.

Já com sistemas elétricos com frequência síncronas, o rotor permanece com rotação zero, pois a frequência de escorregamento é igual à zero (AREZKI, SANJOY, PIERRE, 2006). Para determinar a velocidade de rotação do transformador defasador tem-se as seguintes equações associadas a ele:

$$f_{RM} = f_S - f_R \quad (3-1)$$

$$\omega_{RM} = f_{RM} \cdot \frac{120}{N_P} \quad (3-2)$$

Onde,

f_S = Frequência elétrica da tensão nos enrolamentos do estator, em Hz;

f_R = Frequência elétrica da tensão nos enrolamentos do rotor, em Hz;

f_{RM} = Frequência de rotação mecânica no rotor, em Hz;

N_P = Número de polos do transformador rotativo;

ω_{RM} = Velocidade de rotação mecânica do rotor, em rpm.

Para exemplificar uma conexão de sistemas assíncronos com auxílio do VFT, tem-se um transformador rotativo de 4 polos efetuando a conexão entre duas redes, sendo uma com frequência de 60 [Hz] e a outra com frequência de 58 [Hz]. Levando os parâmetros acima nas equações (3.1) e (3.2), tem-se a velocidade de rotação de 60 [rpm], então a máquina motora terá de impelir uma rotação de 60 [rpm] no eixo do transformador rotativo, para que se consiga o defasamento angular necessário para a transmissão de potência elétrica entre as redes.

Comparada com as velocidades de rotação de máquinas de indução com rotor bobinado (3600, 1800 [rpm]), a rotação de 60 [rpm] é relativamente pequena, isso poderia ser ainda reduzido, pois a rotação é inversamente proporcional ao número de polos do transformador rotativo, não sendo assim um empecilho para sua implementação é manutenção dos anéis coletores do rotor.

3.1.4 – Defasamento Angular e Fluxo de Potência.

A potência ativa transferida entre as redes elétricas conectadas ao VFT é proporcional à variação angular entre os enrolamentos do rotor e do estator do transformador rotativo, ou seja, o defasamento angular entre as redes. Como ocorre nos sistemas de corrente alternada, a rede que estiver em avanço fornecerá potência elétrica, e quanto maior o avanço maior será a potência ativa transferida. As impedâncias da rede e do transformador rotativo determinam o quanto deve ser este avanço, para uma dada transferência de fluxo de potência.

O fluxo de potência reativo através do VFT obedece as mesmas regras para sistemas convencionais AC, ele é determinado pela série de impedâncias do transformador e pela diferença de magnitude das tensões das duas redes conectadas ao equipamento. Ao contrário das alternativas eletrônicas para conexão de sistemas assíncronos, o VFT não produz harmônico e conseqüentemente não provoca interferências indesejáveis nos geradores vizinhos ou a outros equipamentos da rede (LARSEN, PIWKO, MCLAREN, MCNABB, GRANGER, DUSSEAULT, ROLLIN, PRIMEAU, 2004).

A seguir é apresentado as equações que norteiam a transferência de potência elétrica, utilizando um VFT ideal, sem representar a reatância de magnetização e a corrente de magnetização (AREZKI, SANJOY, PIERRE, 2006).

$$P_{VFT} = \frac{V_s V_r}{X_{sr}} \sin(\theta_s - (\theta_r + \theta_{rm})), \text{ ou} \quad (3-3)$$

$$P_{VFT} = \frac{V_s V_r}{X_{sr}} \sin \theta_{net} \quad (3-4)$$

Onde,

- P_{VFT} Potência elétrica através do VFT;
- V_s Tensão nos terminais do estator;
- V_r Tensão nos terminais do rotor;
- X_{sr} Reatância total entre os terminais do VFT;
- θ_s Ângulo de fase da tensão do estator em relação à referência;

- θ_r Ângulo de fase da tensão do rotor em relação à referência;
- θ_{rm} Ângulo de fase do rotor em relação ao estator do VFT;
- θ_{net} Notação representando a simplificação de $\theta_s - (\theta_r + \theta_{RM})$.

O VFT possui uma transferência teórica máxima de potência elétrica em ambas as direções (P_{MAX}), sendo dado por:

$$P_{XMAX} = \frac{V_s V_r}{X_{sr}} \quad (3-5)$$

Isso ocorre quando o ângulo θ_{net} é próximo de 90° ($\frac{\pi}{2}$ radianos) em qualquer direção:

$$\theta_{net} = (\theta_s - (\theta_r + \theta_{rm})) = \pm 90^\circ \quad (3-6)$$

O VFT deve trabalhar com um ângulo θ_{net} menor do que 90° , pois assim a transferência de potência será estável. Isso implica que a potência possível de ser transferida, é uma fração do valor máximo teórico (AREZKI, SANJOY, PIERRE, 2006). A figura 3.5 apresenta o diagrama fasorial do VFT relacionando os fasores do transformador rotativo.

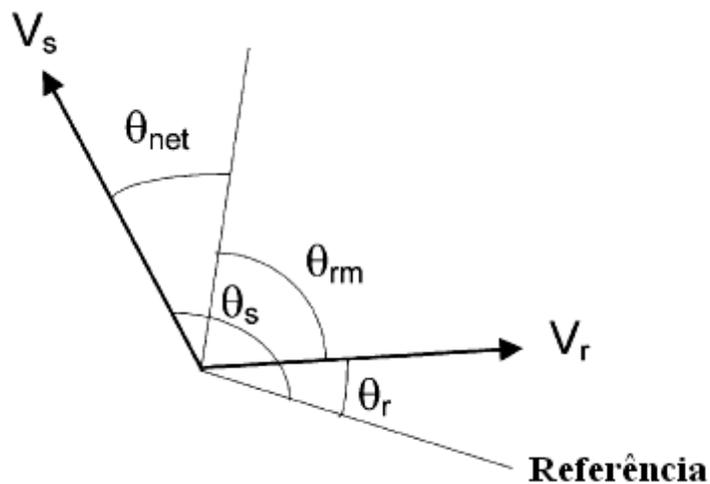


Figura 3.5 – Relação entre os fasores no VFT.

Os ângulos dos fasores são dados pela integral no tempo de suas respectivas frequências, enquanto o ângulo do rotor é dado pela integral de sua velocidade ao longo do tempo. Assim, a potência transmitida é diretamente afetada pela integral da velocidade do rotor ao longo do tempo.

$$P_{VFT} \approx P_{MAX} \cdot \left[\int \omega_S(t) - \omega_R(t) dt - \int \omega_{RM}(t) dt \right] \quad (3-7)$$

Onde,

$\omega_S(t)$ Frequência da tensão do estator em função do tempo;

$\omega_R(t)$ Frequência da tensão do rotor em função do tempo;

$\omega_{RM}(t)$ Velocidade do rotor do VFT em função do tempo.

O VFT está sujeito a variações de frequência nas redes conectadas à ele, assim o sistema de controle deve constantemente monitorar o posicionamento relativo do defasamento angular do rotor em relação ao estator, e assim corrigir distúrbios de frequência que estiver entre as redes. Como o VFT é uma máquina de indução com rotor bobinado (transformador rotativo) que interliga as redes, o torque eletromagnético impelido pela máquina motora deve ser igual ao torque gerado pelo transformador defasador. Caso não seja aplicado torque ao rotor do VFT, ele tenderá a alinhar os campos do rotor e do estator, e assim o fluxo de potência entre as redes cessará. Os fluxos de potências no VFT são apresentados na figura 3.6.

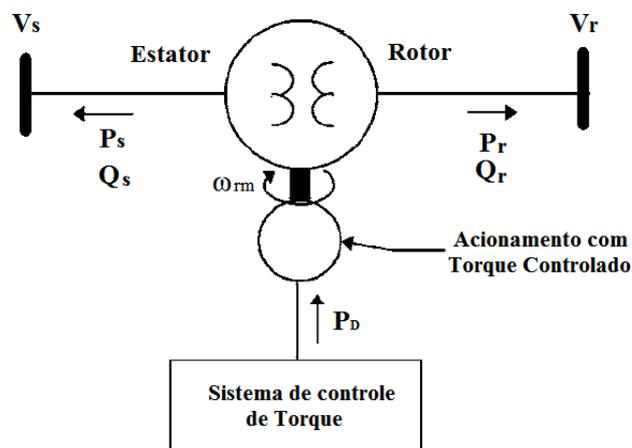


Figura 3.6 – Fluxo de Potência no Transformador de Frequência Variável.

As grandezas apresentadas na figura 3.6 são: P_D é a potência mecânica transmitida para o eixo do transformador rotativo através da máquina motora, P_s é a potência elétrica no enrolamento do estator e P_R é a potência elétrica no enrolamento rotor. O fluxo de potência das grandezas acima, o sinal positivo é adotado para potência elétrica entrando no eixo do transformador rotativo através da máquina motora, e para potências saindo dos enrolamentos do rotor e do estator, como indicado nas setas (AREZKI, SANJOY, PIERRE, 2006).

Desconsiderando as perdas, e considerando que as potências que entram têm que ser iguais às que saem, temos que:

$$P_s = P_D - P_R \quad (3-8)$$

O VFT tem a estrutura semelhante a um transformador comum, assim, considerando que os enrolamentos do rotor e do estator enlaçam o mesmo fluxo de potência, o número de ampères-espiras do estator deve ser igual ao do rotor, então se pode escrever:

$$N_s \cdot I_s = - N_R \cdot I_R \quad (3-9)$$

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;

Apesar do fluxo magnético enlaçado pelos enrolamentos do estator e do rotor sejam iguais no VFT, as frequência podem diferir, com isso a tensão irá também diferir da mesma forma, podendo ser expresso da seguinte forma (AREZKI, SANJOY, PIERRE, 2006).

$$V_s = N_s \cdot f_s \cdot \Psi_a \quad (3-10)$$

$$V_R = N_R \cdot f_R \cdot \Psi_a \quad (3-11)$$

Combinando as equações (3-10) e (3-11) tem-se:

$$\frac{V_R}{N_R} = \frac{V_S}{N_S} \cdot \frac{f_R}{f_S} \quad (3-12)$$

Onde,

V_S tensão nos terminais do estator;

V_R tensão nos terminais do rotor;

f_S frequência elétrica nos terminais do estator (Hz);

f_R frequência elétrica nos terminais do rotor (Hz);

Ψ_a fluxo magnético no entreferro do VFT.

Reorganizando a equação (3-8) e combinando com as equações (3-9) e (3-12) a potência do sistema de acionamento pode ser expresso por:

$$P_D = P_S + P_R \quad (3-13)$$

$$P_D = V_S \cdot I_S + V_R \cdot I_R \quad (3-14)$$

$$P_D = V_S \cdot I_S + \left(N_R \cdot \frac{V_S}{N_S} \cdot \frac{f_R}{f_S} \right) \cdot \left(- \frac{I_S \cdot N_S}{N_R} \right) \quad (3-15)$$

$$P_D = V_S \cdot I_S - V_S \cdot I_S \cdot \frac{f_R}{f_S} = V_S \cdot I_S \cdot \left(1 - \frac{f_R}{f_S} \right) \quad (3-16)$$

$$P_D = P_S \cdot \left(1 - \frac{f_R}{f_S} \right) \quad (3-17)$$

O torque (T_D) produzido pelo sistema de acionamento, pode ser expresso por:

$$T_D = \frac{P_D}{f_{RM}} = \frac{V_S \cdot I_S \cdot \left(1 - \frac{f_R}{f_S} \right)}{f_S - f_R} \quad (3-18)$$

$$T_D = \frac{V_S \cdot I_S \cdot \left(\frac{f_S - f_R}{f_S} \right)}{f_S - f_R} \quad (3-19)$$

$$T_D = \frac{V_S \cdot I_S}{f_S} = N_S \cdot f_S \cdot \Psi_a \cdot \frac{I_S}{f_S} \quad (3-20)$$

$$T_D = N_S \cdot I_S \cdot \Psi_a \quad (3-21)$$

Deve-se notar na equação (3-21) que o torque (T_D) fornecido pelo sistema de acionamento é independente da velocidade de rotação da máquina motora, sendo somente proporcional à corrente do estator e ao fluxo magnético no entreferro.

Desde que o VFT opere com fluxo magnético aproximadamente constante, o torque (T_D) é proporcional somente à corrente do estator. Portanto se a frequência do estator é constante, pode-se dizer que a potência através do VFT é proporcional ao torque (T_D) aplicado ao seu rotor (AREZKI, SANJOY, PIERRE, 2006).

3.1.5 – Modelo Dinâmico do VFT.

Para análise será considerado o VFT como uma máquina trifásica, com uma relação de espiras entre o estator e rotor de 1 para 1. A figura 3.7 apresenta os enrolamentos do VFT e o ângulo θ de defasagem entre rotor e estator (BRIAN, PETER, 2006)

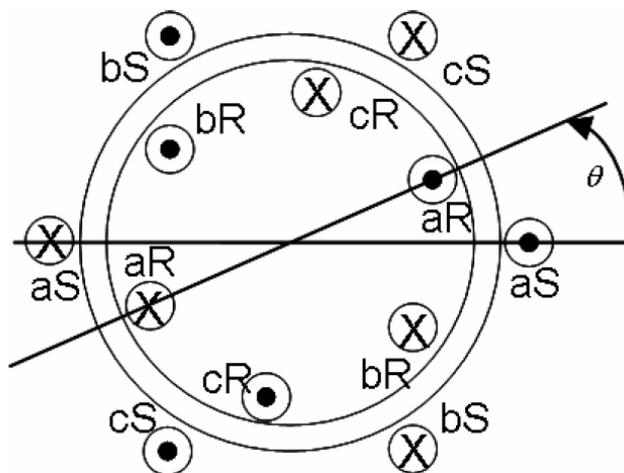


Figura 3.7 – Modelo do VFT e o ângulo de defasamento

$$\theta = \omega_m t + \delta \quad (3.22)$$

Velocidade síncrona de rotação é a rotação de referência, mais a velocidade imposta pelo motor de acionamento:

$$\omega_s = \omega_r + \omega_m \quad (3.23)$$

As equações das indutâncias são dadas por:

$$L_{ss} = L_{ls} + L_{ms} \quad (3.24)$$

$$L_{rr} = L_{lr} + L_{mr} \quad (3.25)$$

$$L_{ms} = aL_{rs} = a^2L_{mr} \quad (3.26)$$

Considerando que as correntes trifásicas que fluem no estator e no rotor são da forma.

Correntes no estator:

$$i_{as} = I_s \cdot \cos(\omega_s t + \alpha) \quad (3.27)$$

$$i_{bs} = I_s \cdot \cos(\omega_s t + \alpha - \frac{2\pi}{3}) \quad (3.28)$$

$$i_{cs} = I_s \cdot \cos(\omega_s t + \alpha + \frac{2\pi}{3}) \quad (3.29)$$

Correntes no Rotor:

$$i_{ar} = I_r \cdot \cos(\omega_r t + \beta) \quad (3.30)$$

$$i_{br} = I_r \cdot \cos(\omega_r t + \beta - \frac{2\pi}{3}) \quad (3.31)$$

$$i_{cr} = I_r \cdot \cos(\omega_r t + \beta + \frac{2\pi}{3}) \quad (3.32)$$

Resulta nos seguintes fluxos enlaçados:

$$\lambda_{as} = L_{ss}i_{as} - \frac{L_{ms}}{2}i_{bs} - \frac{L_{ms}}{2}i_{cs} + i_{ar}L_{sr} \cos \theta + i_{br}L_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_{cr}L_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.33)$$

$$\lambda_{ar} = L_{rr}i_{ar} - \frac{L_{mr}}{2}i_{br} - \frac{L_{mr}}{2}i_{cr} + i_{as}L_{sr} \cos \theta + i_{bs}L_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{cs}L_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.34)$$

Tensões no estator e no rotor serão:

$$V_{as} = R_s i_{as} + \frac{d\lambda_{as}}{dt} \quad (3.35)$$

$$V_{ar} = R_r i_{ar} + \frac{d\lambda_{ar}}{dt} \quad (3.36)$$

Levando em conta a relação de transformação, vem:

$$L'_{lr} = a^2 \cdot L_{lr} \quad (3.37)$$

$$R'_r = a^2 \cdot R_r \quad (3.38)$$

$$V'_r = a \cdot V_r \quad (3.39)$$

$$I'_r = \frac{1}{a} \cdot I_r \quad (3.40)$$

Operando convenientemente, podem-se obter as tensões em módulos e em ângulo:

$$V'_r \angle \theta_r = \left(R'_r + j\omega_r \left(L'_{lr} + \frac{3}{2} L_{ms} \right) \right) I'_r \angle \beta + j \frac{3}{2} \omega_r L_{ms} (I_s \angle \alpha - \delta) \quad (3.41)$$

$$V_s \angle \theta_s = \left(R_s + j\omega_s \left(L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ms} \right) \right) I_s \angle \alpha + j \frac{3}{2} \omega_s L_{ms} (I'_r \angle \beta + \delta) \quad (3.42)$$

$$\begin{bmatrix} V_s \angle \theta_s \\ V'_r \angle (\theta_r + \delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + j\omega \left(L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ms} \right) & j \frac{3}{2} \omega L_{ms} \\ j \frac{3}{2} \omega L_{ms} & R'_r + j\omega \left(L'_{lr} + \frac{3}{2} L_{ms} \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_s \angle \alpha \\ I'_r \angle \beta + \delta \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

$$X_{ls} = \omega L_{ls} \quad (3.44)$$

$$X_{ms} = \frac{3}{2} \omega L_{ms} \quad (3.45)$$

$$X'_{lr} = \omega L'_{lr} \quad (3.46)$$

Circuito equivalente final do VFT por fase é mostrado na Figura 3.8 (BRIAN, PETER, 2006)

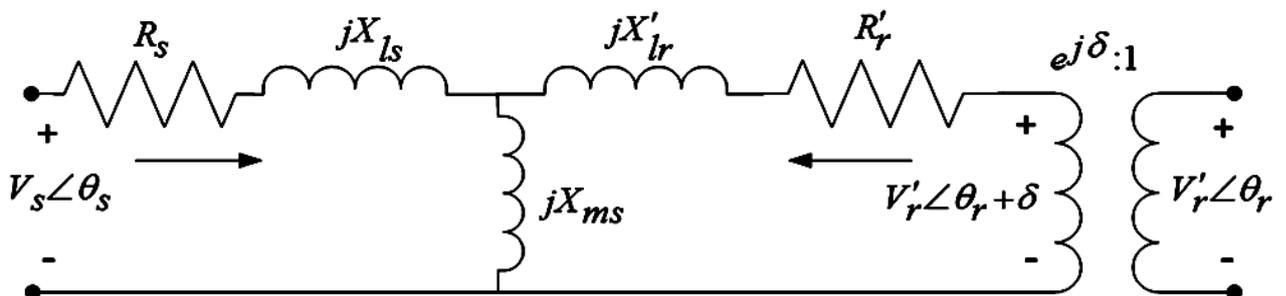


Figura 3.8 – Circuito equivalente do VFT.

O circuito equivalente da máquina têm o objetivo de prever seu comportamento em diversas situações operativas, assim torna-se uma ótima ferramenta para obtenção do comportamento do VFT durante o seu funcionamento. O circuito equivalente apresenta a interação das resistências e reatâncias do estator e do rotor por fase.

Capítulo 4

AVALIAÇÃO DO VFT

Neste capítulo é apresentado a modelagem e a descrição da simulação do VFT, aplicado na conexão da geração hidrelétrica com rotação variável a sistemas síncronos, utilizando para isso o software Matlab® 7.6.0 (2008a) com o seu aplicativo denominado Simulink 7.2. Assim analisar o carregamento de potência elétrica e conjuntamente variações de frequência na entrada e saída do equipamento. Há também a montagem e a coleta de dados práticos em laboratório do VFT.

4.1 - Simulações Teóricas do VFT

Conforme exemplificado nos capítulos anteriores o VFT é um equipamento utilizado para o controle do fluxo de potência entre sistemas elétricos síncronos ou assíncronos. Para abrangência do estudo do equipamento, serão apresentadas simulações do VFT no software Simulink, que provê um ambiente interativo, baseado em diagrama de blocos, voltado para análise de sistemas dinâmicos contínuos, discretos ou híbridos (CHAPMAN, 2009 e ÉLIA, 2008).

A figura 4.1 ilustra o esquema da simulação do VFT no software, observa-se a conexão da rede elétrica (sistema síncrono em 60 [Hz]) ao rotor do transformador defasador e ao estator a ligação do gerador elétrico com rotação variável. Há uma máquina motora (motor de corrente contínua CC), que é utilizado para aplicação do torque no eixo do transformador defasador, este é necessário para que haja transferência de potência entre as redes. Conjuntamente no circuito há o bloco para mensuração dos parâmetros do transformador defasador tais como, corrente elétrica no rotor e no estator, velocidade de rotação do rotor, torque eletromagnético no eixo e ângulo de defasamento do rotor.

Será apresentado posteriormente com maiores detalhes cada componente da simulação no Simulink.

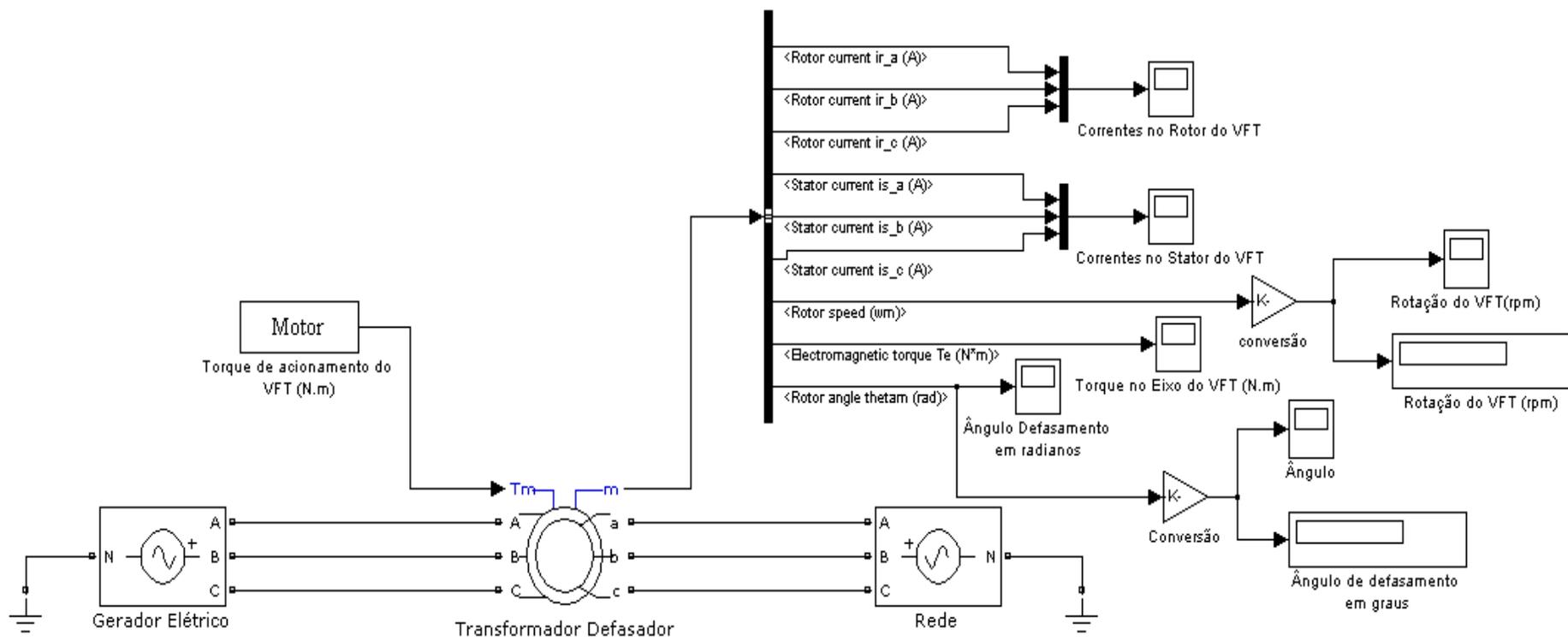


Figura 4.1 – Conexão do VFT utilizando Simulink.

4.1.1 – Transformador Defasador

O transformador defasador é representado no programa por uma máquina assíncrona com rotor bobinado, sendo os enrolamentos trifásicos do estator dado por A, B, C e os enrolamentos trifásicos do rotor representado por a, b, c. Na conexão ***Tm*** (eixo do transformador) é impelido o torque mecânico (N.m), necessário para que haja fluxo de potência através do VFT. Na saída ***m*** é disponibilizado todos os parâmetros do transformador juntos, porém deve-se conectar o bloco denominado Bus Selector, utilizado para separar as medidas como correntes elétricas, velocidade do rotor, defasagem angular e outros dados. Com este bloco pode-se ainda selecionar apenas as medidas de interesse para aplicação (ÉLIA, 2008).

Os parâmetros como resistência e indutância do transformador defasador, foram adotados valores internos de referência do programa, sendo uma máquina de 4 [cv], com 4 polos e tensão de 220 [V], os valores de resistência e indutância do estator foram replicados para o rotor, pois assim não haverá relação de transformação entre o estator e o rotor (primário e secundário).

4.1.2 – Fonte de Tensão

A Fonte de tensão trifásica é inserida para gerar uma tensão trifásica senoidal de sequência positiva. Os parâmetros internos da fonte podem ser programados, tais como amplitude, deslocamento angular da fase e a frequência da componente fundamental da tensão da fonte.

São aplicadas duas fontes de tensão, sendo a primeira utilizada para simular a rede elétrica (sistema síncrono) com tensão de 220 [Volts RMS] e com frequência de 60 [Hz], conectada aos terminais trifásico do rotor do VFT. Já a segunda fonte de tensão está conectada aos terminais trifásicos do estator, esta é aplicada como gerador elétrico com tensão de 220 [Volts RMS] e podendo variar a frequência elétrica conforme desejar. Nas duas fontes de tensão o terminal N é utilizado para equipotencialização das mesmas.

4.1.3 – Torque Eletromagnético

A potência transmitida está intimamente ligada ao defasamento angular entre as redes, para isso é necessário a aplicação do torque no eixo do VFT e assim manter em avanço

elétrico de uma das redes em relação à outra. Quando houver variação na frequência elétrica entre as redes, sendo para mais ou para menos, o torque eletromagnético também terá de variar para compensar estes distúrbios, e assim manter o sistema de transferência de potência estável. Será inserida uma referência de potência elétrica e o sistema de controle atuará no acionamento do motor CC, para que este forneça o torque eletromagnético necessário em Newton metro.

4.1.4 – Parâmetros de Medidas

As medidas do transformador defasador são coletadas na saída m , porém todos os dados estão em um mesmo canal. Para isso é utilizado o bloco “Bus Selector” que possui em sua saída um subconjunto específico de elementos, em função da entrada. As variáveis de saída do bloco podem ser selecionadas, assim apresentar somente os dados relevantes para simulação, este possui medidas mensuráveis do rotor, do estator e medidas mecânicas do transformador rotativo dentre outros.

O bloco de saída tem elementos selecionados com múltiplos sinais autônomos, cada elemento é a saída de uma porta separada de cima para baixo sobre o bloco. O “Bus Selector” aceita a saída de valores reais ou complexos (ÉLIA, 2008). Para simulação foi utilizado amostragem de correntes trifásicas do rotor, correntes trifásicas do estator, velocidade de rotação do eixo do VFT, torque eletromagnético e o defasamento angular do rotor.

A figura 4.1 apresenta somente as partes principais do programa compilado no software Simulink, vale ressaltar que foram utilizados medidores de potência elétrica, constituído de voltímetros e amperímetros em ambas as saídas do VFT. Há conjuntamente um circuito de controle do torque eletromagnético do motor CC na entrada Tm , tendo como principais realimentações de controle, a potência elétrica transmitida e as frequências de entrada e saída no VFT.

4.1.5 - Resultados das Simulações Computacionais do VFT

Para transferência de potência elétrica é necessário primeiramente a conexão entre as redes sem a troca de potência, e somente após a conexão estabelecida se inicia a transferência da potência elétrica. Quando há a conexão de sistemas elétricos com frequências síncronas e não havendo transferência de potência, não é necessária a aplicação de torque para rotação, pois os campos magnéticos do estator e do rotor estão alinhados, portando, não existindo

defasamento angular entre as redes. Caso a conexão seja entre sistemas elétricos com frequências assíncronas, é aplicado um torque eletromagnético para proporcionar a rotação referente ao escorregamento entre os sistemas elétricos conectados ao eixo do VFT, para que os campos magnéticos do rotor e estator sejam alinhados.

A figura 4.2 apresenta os valores simulados para o carregamento da transferência de potência em rampa, inicia-se a conexão do sistema sem a transferência de potência do gerador para a rede, e posteriormente há transferência de potência máxima em uma rampa de 0.5 [segundo], saindo de 0 [W] para um total de 500 [W] entregue à rede. A transferência de potência está ligada ao torque impelido no eixo do transformador defasador através do motor CC. Com o torque haverá o defasamento angular entre o rotor e o estator, e conseqüentemente o crescimento da potência transmitida, como ilustrado na figura 4.2.

Quando se obtêm a potência elétrica transmitida programada, o sistema de controle estabiliza o torque no eixo do transformador, assim o defasamento angular e a potência transmitida entre os sistemas serão constates.

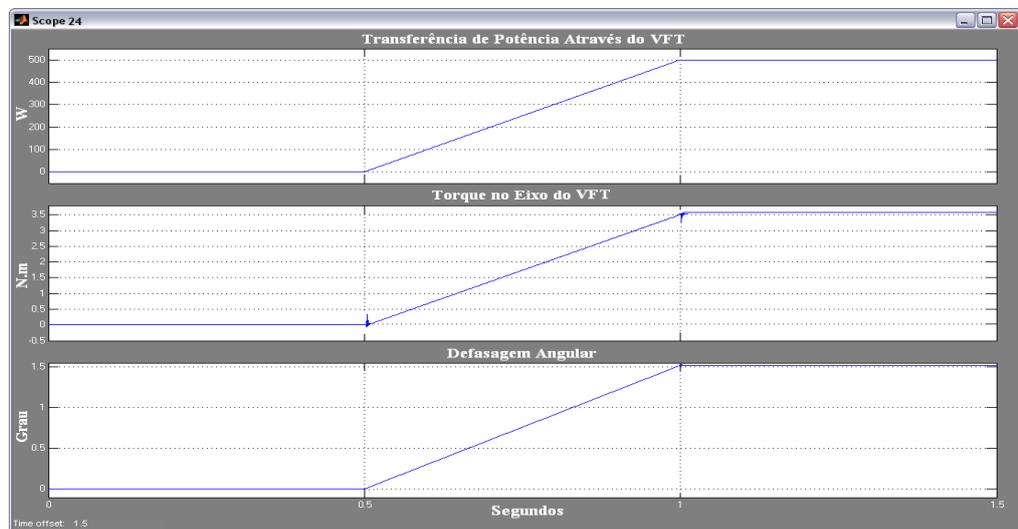


Figura 4.2 – Transferência inicial de potência em rampa com o VFT.

Vale ressaltar que quando conectado, mesmo com as frequências iguais e não havendo transferência de potência, o VFT irá consumir potência de ambas as redes, pois haverá a resistência e a indutância elétrica das bobinas do rotor e do estator conectadas às redes.

Outra forma de iniciar a transferência de potência é o degrau de potência, ou seja, iniciar a transferência máxima de potência em um curto espaço de tempo, isso é requerido pela rede elétrica quando se tem a conexão de uma carga com elevada potência. É apresentada na figura 4.3 a resposta da transferência de potência de 500 [W] em degrau, observa-se o transitório inicial na potência transferida, e um torque eletromagnético elevado necessário para romper a inércia do eixo do transformador rotativo, e assim proporcionar o defasamento angular requerido para o fluxo de potência.

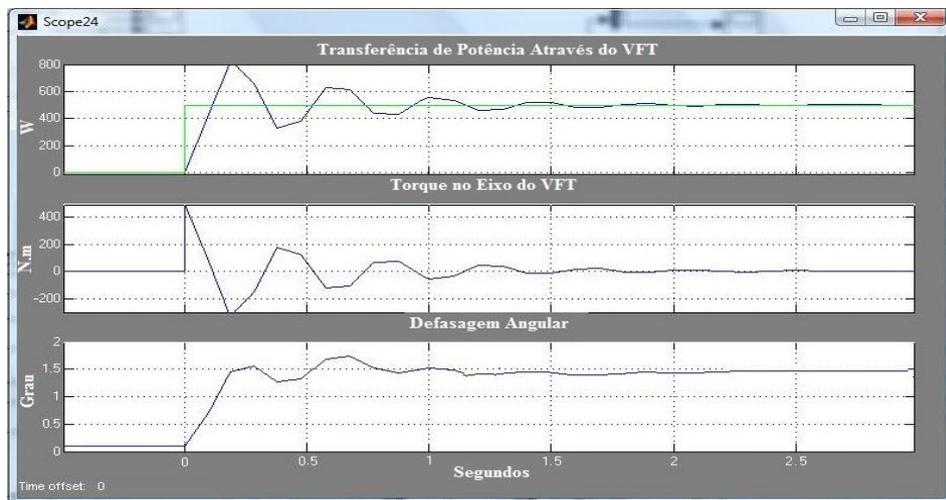


Figura 4.3 – Transferência inicial de potência em degrau no VFT.

Como o torque é impelido através do motor CC do VFT, a corrente de partida do motor CC também será elevada, assim na prática os equipamentos utilizados para o acionamento devem ser projetados para suportar tal estresse. Os resultados apresentados anteriormente mostram as formas de carregamento da potência do transformador defasador com frequências síncronas, o VFT trabalha com potência máxima constante mesmo existindo variações entre as frequências das redes conectadas.

Para exemplificar variações na frequência dos sistemas conectados, o VFT foi carregado com a transferência de potência máxima, a partir da estabilidade da transferência de potência tem-se a variação da rotação do gerador elétrico, conseqüentemente há variação na frequência da tensão de saída do gerador, esta variação se dá em uma rampa de 60 [Hz] para 55 [Hz], como apresentada na figura 4.4.

Para a transferência de potência constante, o defasamento angular entre as redes deve ser linear, sendo assim, para as redes assíncronas é necessário impelir a rotação no eixo do transformador defasador. Esta rotação é proporcional ao escorregamento entre as frequências conectadas. Neste caso, o escorregamento varia de 0 a 5 [Hz] em rampa, esta variação se dá de acordo com a redução da frequência de rotação do gerador, o motor CC do VFT através do sistema de controle, irá compensar a variação com a rotação no eixo do transformador defasador, e assim manter constante a defasagem angular e a potência transferida entre a conexão.

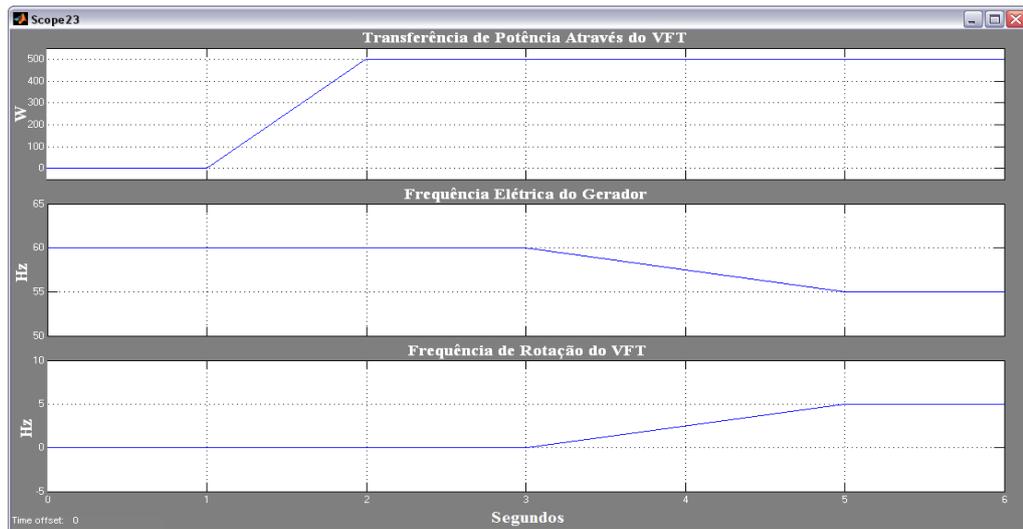


Figura 4.4 – Variação da frequência em rampa sob potência constante.

Para determinar a velocidade de rotações por minuto [rpm] aplica-se as equações (3.1) e (3.2), e com o VFT de 4 polos, se tem uma rotação inicial de 0 [rpm] e final de 150 [rpm]. Apesar da variação da frequência entre os sistemas conectados, a transmissão de potência elétrica não sofre variação durante perturbação entre as frequências, como observado na figura 4.4.

O VFT está suscetível a variações abruptas na frequência elétrica da conexão do gerador com a rede síncrona. Para análise destas variações nas frequências, foi simulado um degrau unitário na frequência elétrica do gerador.

A figura 4.5 apresenta a simulação com a redução de 1 [Hz] na frequência elétrica do gerador conectado, e o sistema de controle aciona o motor CC para compensar a variação na frequência com a rotação. Utilizando as equações (3.1) e (3.2) chega-se a uma rotação de 30

[rpm] durante a variação da frequência, e retornando a 0 [rpm] quando cessa o escorregamento entre as frequências.

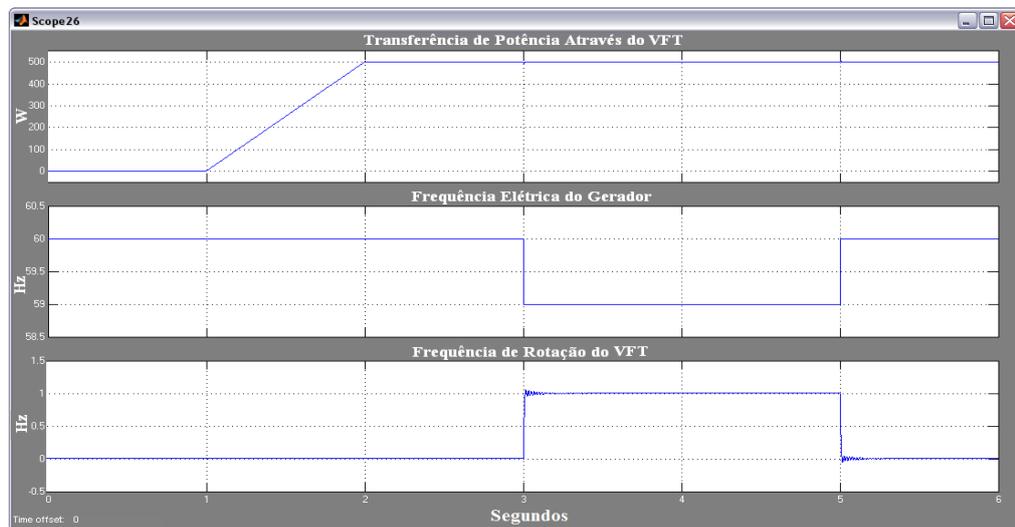


Figura 4.5 – Variação da frequência em degrau inferior sob potência constante.

Apesar de a rotação ter variado para 30 [rpm] e depois para 0 [rpm] novamente, o torque através do motor CC sempre foi aplicado ao eixo do transformador defasador.

Caso o gerador trabalhe com velocidade superior a síncrona, será necessário rotacionar o VFT em sentido oposto, e assim suprimir a frequência elétrica elevada. Neste caso o sistema de controle atuará e inverterá a rotação do Motor CC, para manter a potência transmitida constante, independente do sentido de rotação.

A figura 4.6 ilustra a simulação com a frequência elétrica do gerador elevada em 1 [Hz] em referência a síncrona, verifica-se que a rotação do eixo do VFT tornou-se negativa, neste caso, o sinal negativo significa o sentido inverso de rotação ao verificado nos exemplos anteriores.

Para tanto, o sistema de controle deve ser dotado com dispositivos necessário para o controle da rotação inversa do motor CC. Como aconteceu quando a frequência do gerador era inferior a síncrona, a rotação retornou a 0 [rpm] quando o escorregamento entre as redes tornaram 0 [Hz].

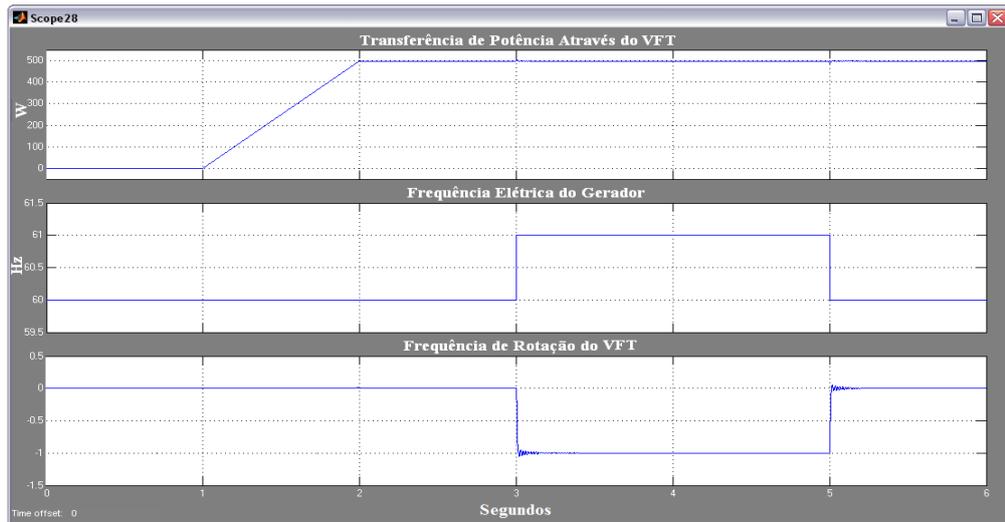


Figura 4.6 – Variação da frequência em degrau superior sob potência constante.

A figura 4.7 exemplifica na mesma simulação o gerador funcionando com frequência igual, superior e inferior à síncrona. Verificam-se oscilações no momento da variação de rotação no eixo do VFT, pois o transitório se dá pela inércia do eixo do gerador.

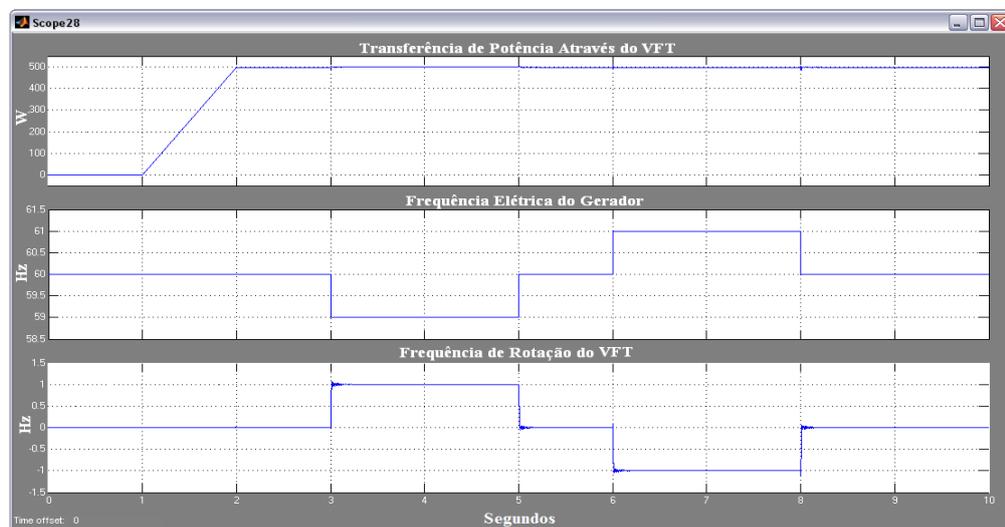


Figura 4.7 – Variação da frequência do gerador superior e inferior a síncrona.

4.2 – Montagem do VFT em Laboratório

O trabalho desenvolvido em laboratório contou com dois equipamentos principais, sendo a geração com rotação variável e o VFT propriamente dito. Tais equipamentos serão descritos posteriormente, a figura 4.8 mostra uma visão geral do laboratório onde os testes foram conduzidos.



Figura 4.8 – Visão geral do laboratório do VFT.

No laboratório foram disponibilizados dois conjuntos de máquinas elétricas, cada conjunto com três máquinas rotativas solidárias aos seus eixos, sendo máquina de corrente contínua, máquina síncrona e máquina de indução trifásica com rotor bobinado, a figura 4.9 apresenta estes equipamentos. Este conjunto traz flexibilidade no que diz respeito à simulação de diversas condições operativas.



Figura 4.9 – Visão do conjunto das máquinas elétricas.

Característica de cada conjunto de máquinas utilizado em laboratório.

- Máquina de indução com rotor bobinado (transformador rotativo), dados de placa:
Potência nominal: 2,25 [kW]; Número de fases: 3 [fases]; Tensão nominal: 220 [V];
Corrente nominal: 8,8 [A]; Fator de potência nominal: 0,82; Rendimento: 0,82
Rotação nominal: 1700 [rpm]; Tensão nominal do rotor: 77 [V]; Corrente nominal do rotor: 20,2 [A].
- Máquina de corrente contínua (máquina motora), dados de placa:
Potência nominal: 2 [kW]; Tensão nominal: 220 [Vcc]; Corrente nominal: 9,1 [A];
Rotação nominal: 1800 [rpm]; Tensão de campo: 220 [Vcc]; Corrente de campo: 0,6 [A – Máximo].
- Máquina síncrona (gerador elétrico), dados de placa:
Potência nominal: 2 [kVA]; Número de fases: 3 [fases]; Tensão nominal: 220 [V];
Corrente nominal: 5,0 [A]; Fator de potência nominal: 0,8; Rotação nominal: 1800 [RPM];
Tensão de excitação: 220 [V]; Corrente de excitação: 0,6 [A - Máximo].

4.2.1 – Gerador com Frequência Variável.

Para geração com rotação variável (gerador assíncrono) foi utilizado um conjunto de máquinas, sendo a máquina síncrona funcionando como um gerador elétrico e conectado ao seu eixo um motor de corrente contínua, funcionando como a turbina hidráulica, na figura 4.10 tem-se a disposição dos equipamentos.



Figura 4.10 – Montagem do gerador elétrico acoplado ao motor acionador.

Neste conjunto o motor de corrente contínua é alimentado através de uma ponte tiristorizada, cujo disparo dos tiristores é controlado por um módulo especificamente desenvolvido para este fim, a figura 4.11 apresenta o módulo de disparo e a ponte de tiristores para controle do motor CC. O controle do ângulo de disparo dos tiristores tem o objetivo de variar a tensão aplicada à armadura do motor de corrente contínua e assim controlar a velocidade de rotação do mesmo, para isso mantendo-se a tensão de campo do motor constante. Para esta potência elétrica de acionamento, pode ser utilizado uma fonte chaveada para controle do motor de corrente contínua da geração com rotação variável.

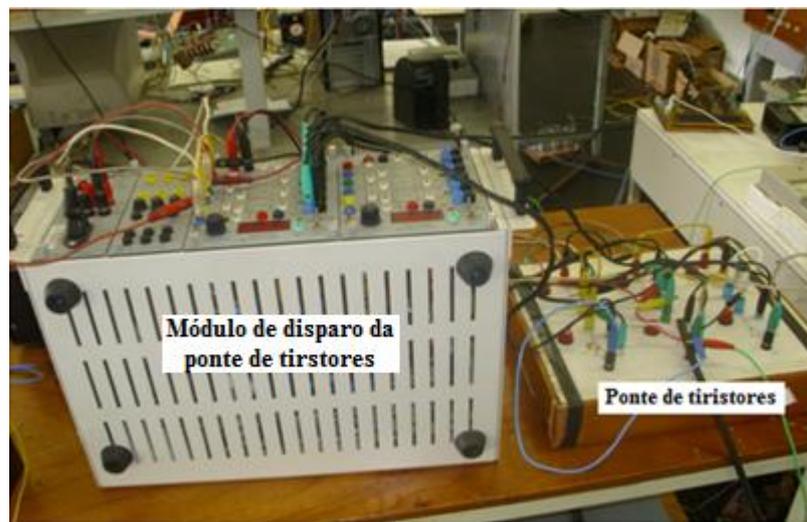


Figura 4.11 – Ponte de tiristores e seu módulo de disparo para o motor CC do gerador.

Como a rotação do motor CC (máquina primária) é ajustável, a tensão gerada no gerador elétrico (máquina síncrona) terá a frequência da tensão proporcional à rotação imposta pelo motor CC.

4.2.2 – Transformador de Frequência Variável.

O transformador de frequência variável foi montado utilizando o outro grupo de máquinas elétricas disponíveis no laboratório. Para simular o transformador defasador foi utilizada a máquina assíncrona com rotor bobinado, e acoplado ao seu eixo para impelir o torque necessário para transferência de potência elétrica, encontra-se o motor de corrente contínua (máquina motora), como apresentado na figura 4.12.

Na figura 4.12 observa-se a presença do autotransformador (transformador elevador), necessário neste caso, para compatibilizar a tensão do rotor do VFT com a tensão da rede elétrica ao qual se interligará.

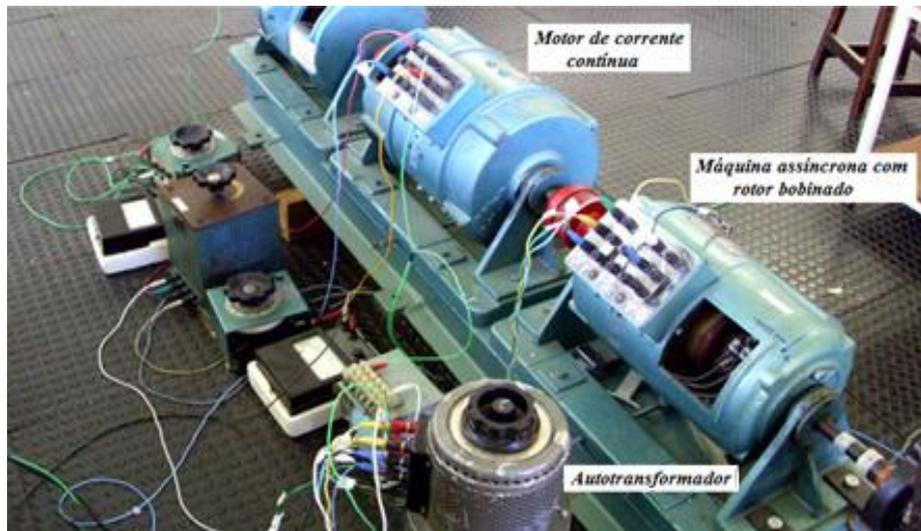


Figura 4.12 – Montagem do VFT.

A figura 4.13 apresenta o circuito de disparo do motor CC do VFT, e o condicionamento dos sinais para o controle da frequência elétrica e do fluxo de potência através do transformador defasador.

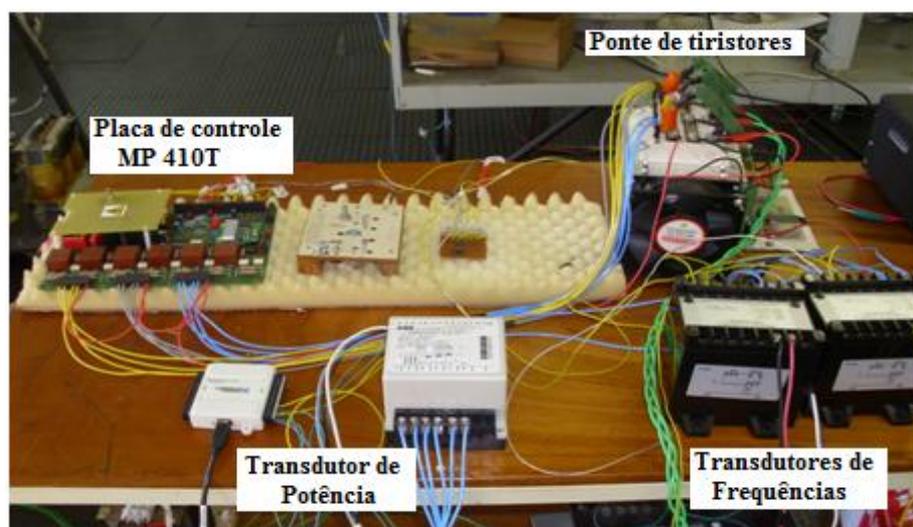


Figura 4.13 – Montagem do condicionamento de sinais e acionamento do VFT.

Para o acionamento do motor CC do VFT, foi utilizada a placa de controle micro processada da Semikron denominada MP410T, esta dotada de sistema de controle por realimentação, que controla os disparos da ponte de tiristores e conseqüentemente a velocidade e o torque do motor (SEMIKRON, 2001). A ponte tiristorizada de disparo do Motor CC é dotada de um circuito “snubber”, que evita a queima dos tiristores pelas sobretensões oriundas do chaveamento de circuitos indutivos. Há os transdutores de potência elétrica (Transdutor ETP 30 da ABB) e transdutores de frequência elétrica, estes utilizados para o controle da transferência de potência e da frequência elétrica, sendo o VFT conectado a rede ou a sistemas isolados.

Na figura 4.14 tem-se o Autotransformador utilizado para elevar e igualar a tensão de saída do transformador defasador com a tensão da rede. Esta variação ocorre devido o transformador defasador conter relação de transformação entre os enrolamentos do estator e do rotor (primário e secundário). No na simulação temos a entrada da tensão de 220 [V] e a saída do transformador defasador com 66 [V], com isso necessitando do Autotransformador para elevar de 66 [V] para 220 [V].



Figura 4.14 – Autotransformador aplicado na conexão do VFT

Para análise e compreensão dos dados pertinentes ao VFT, foi utilizada a placa de aquisição de sinais da National Instruments USB 6009, esta aplicada para aquisição de dados como potência transmitida, frequência elétrica do gerador, frequência elétrica da rede e frequência de rotação do VFT. A figura 4.15 apresenta a placa com suas conexões para coleta dos dados.

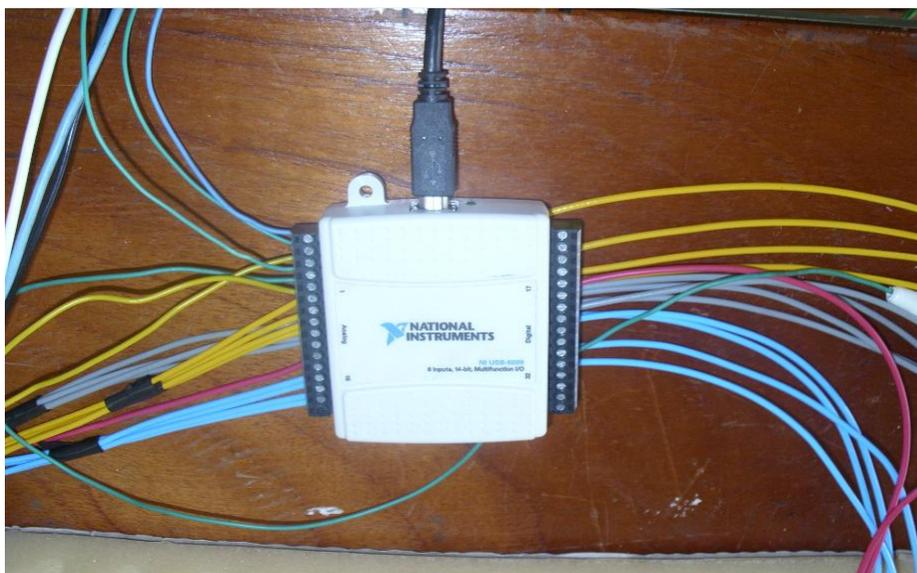


Figura 4.15 – Placa de aquisição de dados do VFT

4.2.3 – Montagem do VFT para Transferência de Potência Conectada.

A utilização direta do VFT é o controle de potência entre sistemas elétricos, em laboratório foi efetuada a montagem para controle da potência transferida do gerador elétrico assíncrono para rede síncrona. Para o controle da potência elétrica transmitida à rede, tem-se a referência de potência na placa de controle MP410T (condicionamento de sinais) e o transdutor de potência que fornece a realimentação para a placa de controle atuar e manter contínua a transferência de potência.

A figura 4.16 ilustra o esquema elaborado em laboratório do VFT para conexão dos sistemas. O gerador elétrico é ligado aos enrolamentos do estator do VFT, e os enrolamentos do rotor são conectados ao transformador elevador, e a saída deste conectada à rede elétrica.

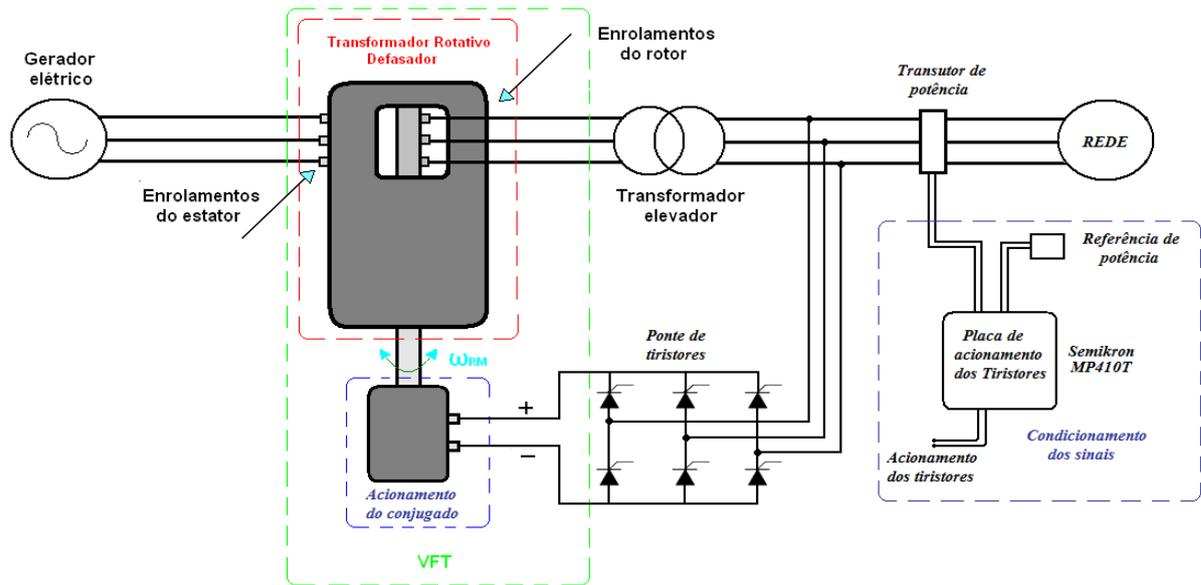


Figura 4.16 – Montagem do VFT para sistema conectado.

Nesta configuração o VFT é sincronizado e efetua a conexão do gerador à rede, e a potência a ser transferida é estabelecida pela referência de potência no sistema de controle, que atua sobre a ponte de tiristores e, por conseguinte, sobre o torque no eixo do motor CC do conjunto VFT.

Com a conexão elétrica inicia-se a transmissão da potência elétrica do gerador para a rede, onde estabeleceu-se uma referência de 500 [W] de potência a ser entregue à rede e com fator de potência para rede igual a 1. Durante a transferência de potência foi efetuada a variação da frequência elétrica do gerador de 60 [Hz] para 50 [Hz] de 1 em 1 [Hz], e coletados dados relativos a simulação. Observa-se que mesmo com a variação da frequência do gerador a transferência de potência permanece constante, vide dados tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Potências elétricas do sistema e do VFT.

Freq. Do gerador	Potência Transmitida	Potências medidas na entrada do VFT procedente do gerador variável.			Potência do Motor CC	Rotação do VFT
		S (VA)	P (W)	Q(Var)		
Hz	P (W)	S (VA)	P (W)	Q(Var)	P (W)	rpm
50	500	1080	708	814	219,78	300
51	500	1100	718	831	212,11	270
52	500	1120	737	850	202,47	240
53	500	1150	750	875	190,36	210
54	500	1170	760	885	172,75	180
55	500	1190	775	900	160,37	150
56	500	1220	785	926	143,40	120
57	500	1240	800	950	127,98	90
58	500	1260	818	970	111,35	60
59	500	1280	830	985	95,43	30
60	500	1310	855	1010	56,34	0

A tabela 4.1 apresenta os seguintes dados: frequência elétrica da tensão do gerador, potência transmitida para rede, potências na entrada do VFT, potência requerida pelo motor CC e a rotação do eixo do VFT em função da variação da frequência do gerador, este necessário para manter o defasamento angular entre as redes. Vale salientar que como toda máquina de indução o VFT necessita de reativa para a sua magnetização. A energia reativa necessária para magnetização do VFT e do autotransformador está sendo fornecida pelo gerador. Esta potência reativa despendida pelo gerador elétrico poderia ser fornecida por bancos de capacitores instalados na entrada e/ou na saída do VFT.

Na Figura 4.17 são apresentados dados das potências ativas relacionadas à transmissão elétrica através do VFT, sendo potência elétrica ativa entregue à rede (saída do VFT), potência ativa fornecida pelo gerador (entrada do VFT) e a potência requerida do motor CC para acionamento do transformador defasador.

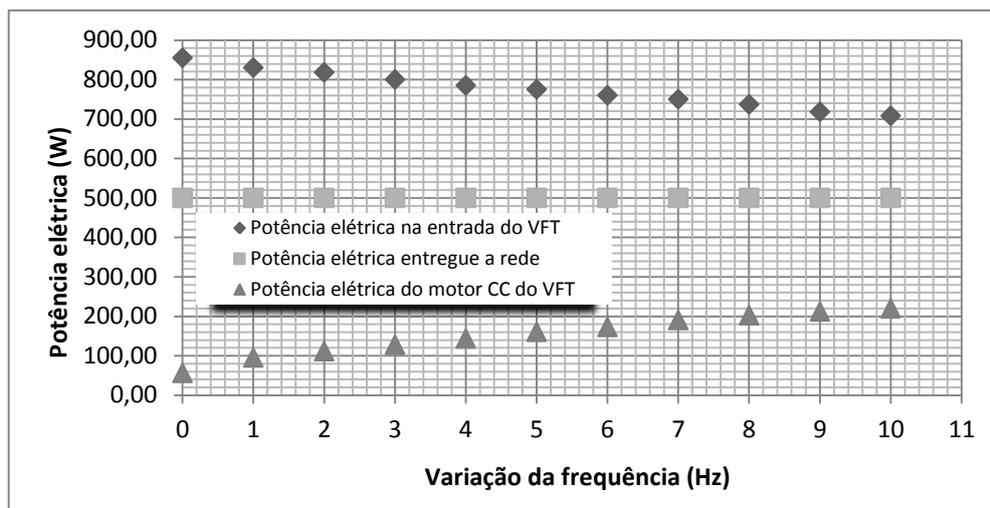


Figura 4.17 – Potências ativas relacionadas ao VFT.

O sistema de controle tem a função de manter estável a potência entregue à rede, independente da variação de frequência na tensão elétrica do gerador, esta estabilidade é conseguida através do acionamento do motor CC. Inicialmente a figura 4.18 apresenta as curvas de dados coletados com o sistema trabalhando com frequências síncronas (as frequências estão divididos por 10) transferência de potência máxima de 500 [W] (no transdutor de potência a saída 4,5 volts corresponde a 500 [W] de transferência de potência), no decorrer da simulação há declínio da frequência elétrica do gerador e o sistema de controle proporcionalmente eleva a frequência de rotação do motor CC, mantendo constante a transferência de potência. As frequências elétricas estão em Hz, a potência em Watts e o tempo em segundos.

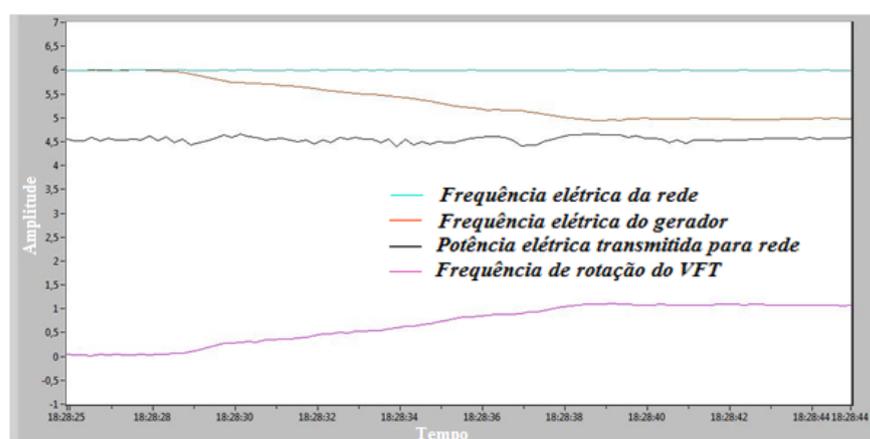


Figura 4.18 – Dados com variação da frequência inferior do gerador.

Vale a observação que como apresentado nos capítulos anteriores, o VFT pode trabalhar com a frequência da tensão de entrada inferior ou superior à frequência síncrona da rede elétrica. A figura 4.19 apresenta os dados: curva de transferência de potência máxima, frequência do gerador inferior e superior à da rede e o sentido de rotação do motor CC do VFT positiva e negativa (sentido de rotação horário e anti-horário). No momento em que a frequência elétrica do gerador seja superior a da rede, a rotação do motor CC do VFT inverte a frequência de rotação (sentido de rotação), para manter o ângulo de defasamento constante.

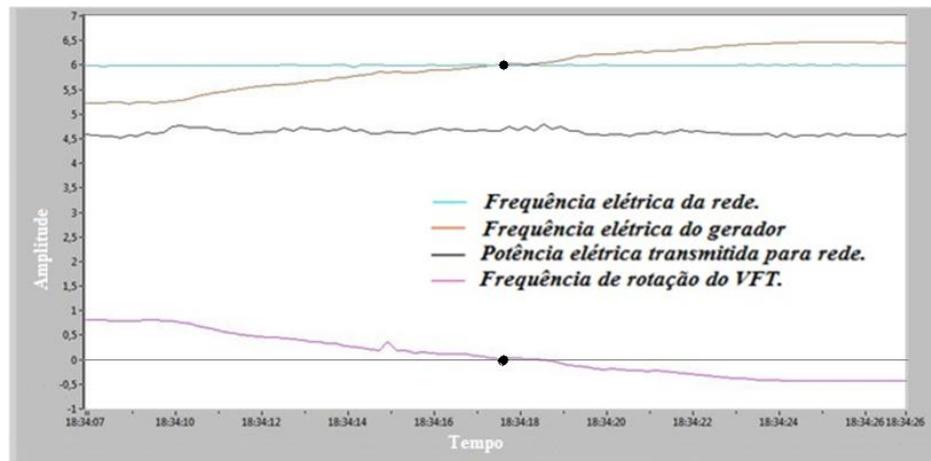


Figura 4.19 – Dados com variação da frequência inferior e superior do gerador.

4.2.4 – Montagem do VFT para Transferência de Potência Isolada.

O VFT pode trabalhar para fornecer potência a sistemas elétricos isolados, pois controla-se a frequência elétrica da carga isolada independentemente da frequência de entrada do gerador elétrico. No sistema isolado a malha de controle do VFT utiliza a referência em frequência, para isso aplica-se o transdutor de frequência e a potência transmitida dependerá da carga instalada. A figura 4.20 ilustra as conexões do VFT efetuada em laboratório, esta conexão é semelhante ao utilizado no exemplo anterior na transferência de potência elétrica para rede síncrona, diferindo apenas que a carga é isolada e o sistema de controle com referência em frequência, o inverso do sistema conectado que possui referência em potência.

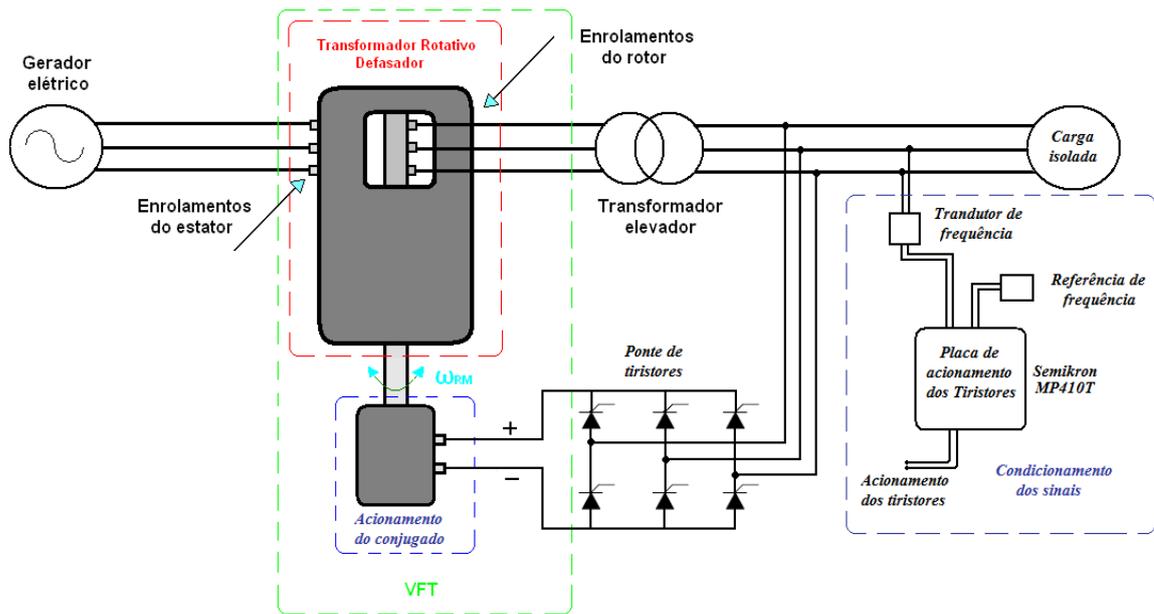


Figura 4.20 – Montagem do VFT para sistema isolado.

A potência através do VFT é determinada pela carga do sistema isolado, o VFT será construído para uma máxima potência elétrica, caso exceda a potência máxima, o sistema de proteção atuará para não danificar os equipamentos.

Para as simulações do sistema isolado foi utilizada carga resistiva com potência de 420 [W] como apresenta a figura 4.21, e o sistema de controle com referência de frequência elétrica na carga de 60 [Hz].

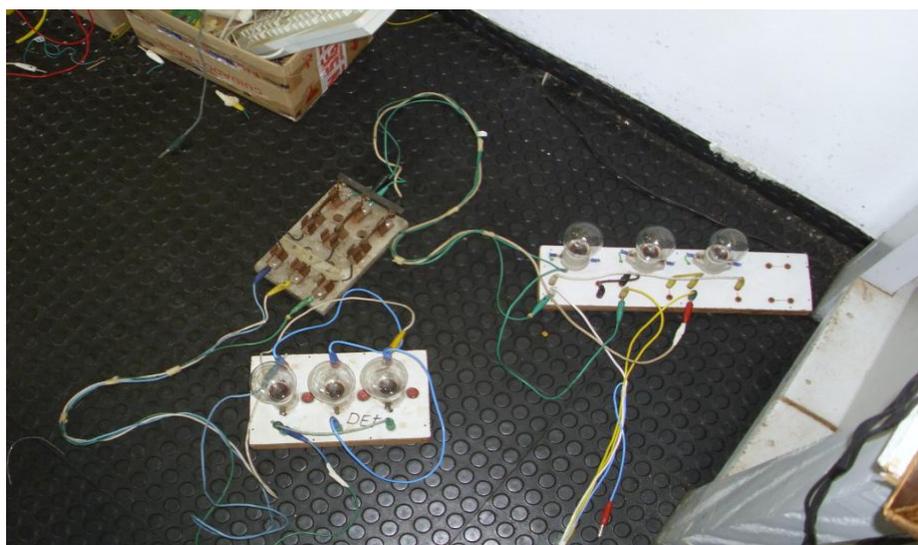


Figura 4.21 – Carga resistiva para o sistema isolado.

A figura 4.22 apresenta as seguintes curvas: frequência elétrica na carga, potência elétrica da carga, frequência elétrica do gerador e a frequência de rotação do transformador defasador. As frequências elétricas estão em Hz, a potência em Watts e o tempo em segundos. A simulação prática iniciou-se com a frequência elétrica de geração inferior a 60 [Hz], e com potência de transferência máxima no valor de 420 [W]. Com a elevação da frequência elétrica do gerador próxima a 60 [Hz], houve a redução da rotação do VFT até próximo de zero. Mesmo com a variação da frequência elétrica de geração, a frequência elétrica de saída e a potência permanecem constantes.

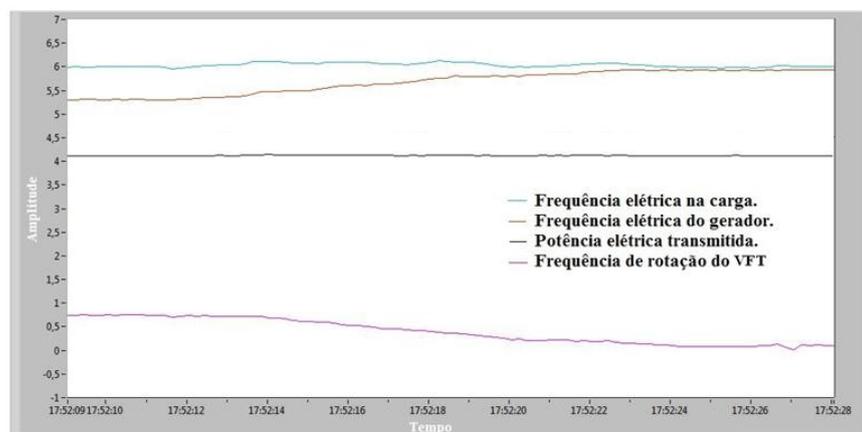


Figura 4.22 – Sistema isolado com variação em rampa da frequência do gerador

Na simulação o VFT funciona sob carga constante e frequência variável, para estudos de aplicação é necessário o estudo do sistema isolado com variação na carga, ou seja, efetuar a conexão ou desconexão abrupta de potência elétrica. Isso ocorre quando são ligados ou desligados equipamentos com elevada potência elétrica, que estão sendo suprido pelo sistema isolado.

Na figura 4.23 têm-se as curvas da simulação com variação abrupta da carga no sistema isolado, a geração está com frequência inferior a 60 [Hz], e a carga com potência máxima. Então é retirada a carga instantaneamente, assim a geração tende a elevar as frequências sem a carga, porém o sistema de controle atua e em aproximadamente dois segundos o sistema estabiliza. Posteriormente a carga retirada é inserida abruptamente, a frequência do gerador e da carga tende a redução, e novamente o sistema de controle efetua as correções.

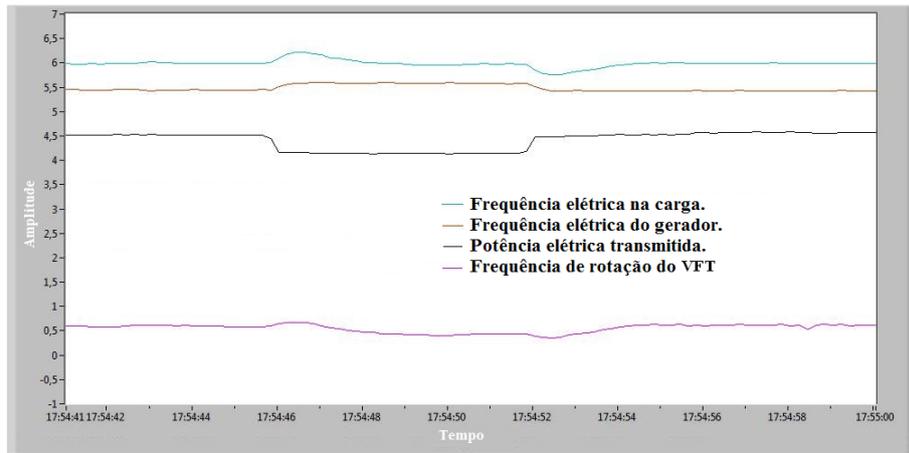


Figura 4.23 – Sistema isolado com variação em degrau da potência da carga.

Com as simulações teóricas pode-se verificar a resposta do VFT utilizado para a conexão da geração assíncrona com a rede síncrona, a partir deste dados pode-se comparar com a resposta das simulações práticas em laboratório. Concluindo que os dados teóricos simulados relacionados ao VFT estão de acordo com os dados obtidos em laboratório. Assim o VFT torna-se uma opção a mais para efetuar a conexão de sistemas elétricos assíncronos, e também aplicado para fornecer potência elétrica a sistemas elétricos isolados.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A partir de estudos foram detectados benefícios auferidos com a variação da velocidade de rotação das turbinas hidráulicas, podendo trabalhar em um ponto ótimo do equipamento e assim mitigar problemas relacionados às turbinas como vórtice, cavitação, vibrações e conjuntamente obter uma eficiência de conversão superior de geração de potência.

Com a variação da velocidade de rotação das turbinas hidráulicas a frequência elétrica da tensão do gerador irá variar proporcionalmente, tornando-se necessário a utilização de um equipamento para manter a frequência elétrica do gerador constante, para este problema existe algumas tecnologias passíveis de utilização, dentre elas está o Transformador de Frequência Variável, conhecido como VFT.

O trabalho teve como finalidade apresentar as características do VFT como aspectos teóricos pertinentes, simulações computacionais e análise prática. No laboratório foi simulado a geração elétrica a partir de turbinas hidráulicas com rotação variável, obtendo o comportamento do transformador de frequência variável perante a conexão de redes elétricas síncronas ou assíncronas.

Com a análise foi possível comprovar a viabilidade da transferência de potência, utilizando o VFT na conexão do gerador variável com a rede síncrona e na conexão do gerador variável com um sistema isolado. Contudo deve ser abordado que o VFT por se tratar de uma máquina de indução com rotor bobinado que não foi projetado especificamente para este funcionamento, e por conter tecnologias construtivas superadas apresentou considerável perdas elétricas.

No contexto os resultados apresentados para diferentes situações o VFT apresentou-se como uma tecnologia viável para propiciar a conexão do gerador elétrico (sistema assíncrono) com a rede elétrica (sistema síncrono), e no fornecimento de potência elétrica para o sistema isolado a partir da geração com rotação variável.

A título de continuidade do trabalho, são apresentadas abaixo algumas propostas:

- Implementar o controle contínuo do fluxo de potência através de sistema computacional.
- Projetar e construir o transformador de frequência variável para uma análise da aplicação.
- Efetuar a simulação inserindo capacitores para fornecer a potência reativa requerida pelo VFT.
- Estudo sobre dispersão de fluxo magnético no entreferro (gap).
- Efetuar o estudo do transformador defasador funcionando conjuntamente como transformador elevador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, H. S.; *Análise do Comportamento de Turbinas Hidráulicas para Operar com Velocidade Variável*. Dissertação de Mestrado - Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI, 1999.

AREZKI M., SANJOY U., PIERRE D. *Variable Frequency Transformer – An Overview*. Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2006.

ARJAN CARVALHO VINHASES, *Utilização do Transformador de Frequência Variável na Interligação de Sistema Elétricos*. Dissertação de Mestrado – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, 2009.

BRIAN C. RACZKOWSKI, PETER W. SAUER, *Modeling, Simulation, and Analysis of Variable Frequency Transformers*. Power & Energy Systems, 2006.

CAMPOS BARROS J.G., SAIDEL M. A ., INGRAN L., WESTPHALEN M. *Adjustable Speed Operation of Hydro Electric Turbine Generators*. Electra Magazine, no. 167, Agosto, 1996.

CHAPMAN, Stephen J. *Programação em MATLAB para engenheiros*. Tradução de Flávio Soares Correa da Silva. 2 reimpr. São Paulo: Cengage Learning, 2009.

ÉLIA YATHIE MATSUMOTO. *Simulink 7.2 – Guia Prático*. Ed. 1, Érica, 2008.

GREEN, D. A. *Generation More Efficiently with Adjustable Speed Machines*. Hydro Review, Volume 13, No. 2, p. 18 – 27, Abril 1994.

JAMAL A. BAROUDI, VENKATA DINAVAHU, ANDREW M. KNIGHT. *A Review of Power Converter Topologies for Wind Generators*. Renewable Energy, vol. 32, nº 1, 2007.

JERFERSON MARQUES; *Turbinas Eólicas: Modelo, Análise e Controle do Gerador de Indução com Dupla Alimentação*. Dissertação de Mestrado – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

KELBER, C.R.; *Geração Hidrelétrica em Regime de Velocidade Ajustável Empregando Máquinas de Dupla Alimentação com Conversor Estático no Circuito Rotórico*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1997.

LARSEN E., R. PIWKO, D. MCLAREN, D. MCNABB, M. GRANGER, M. DUSSEAUULT, LP. ROLLIN, J. PRIMEAU. *Variable-Frequency Transformer – A New Alternative for Asynchronous Power Transfer*. GE Energy and Hydro-Québec Setembro, 2004.

LUIZ, M.O.S; *Geração em Velocidade Ajustável Utilizando Máquina de Dupla Alimentação*. Dissertação de Mestrado – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

PIWKO R.J., LARSEN E.V., WEGNER C.A. *Variable Frequency Transformer – A New Alternative For Asynchronous Power Transfer*. Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa, IEEE, 2005.

REIS, L.B.; *Usinas Hidrelétricas com Rotação Variável – Opção Energética para Longas Distâncias, Aproveitamentos de Pequeno Porte e Reversíveis*. Tese Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, 1993.

RICHARD J. PIWKO, EINAR V. LARSEN. *Variable Frequency Transformer – FACTS Technology for Asynchronous Power Transfer*. Transmission and Distribution Conference and Exhibition, IEEE, p. 1426-1428, Maio 2006.

SAIDEL, M.A. *Rotação Ajustável em Usinas Hidrelétricas: Novas Premissas para o Planejamento Energético*. Tese Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, 1995.

SEMIKRON. *Digital Thyristor Trigger Module – MP 410T*. 2001. Disponível em: <<http://www.semikron.com>>. Download em março de 2010.

SPORILD ROALD, GJERDE JAN OVE, GJENGEDAL TERJE. *Economic And Technical Aspects of Adjustable Speed Hydro (ASH) Machines Applied For Improved Stability in Power Networks*, Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, p. 2469 – 2474, vol.4, 2000.

TENOT, A . *Turbines Hydrauliques et Régulateurs Automatiques de Vitesse*, Librairie de L'enseignement Technique Léon Eyrolles Éditeur, vol II, 1932.

VIANA , A. N. C., ALENCAR, H. S.; A. *Análise Experimental de Turbinas Hidráulicas Operando com Rotação Variável*. Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI, 1999, Grupo de Trabajo Sobre Hidromecánica 5ª Reunión INFIA.