

GERAÇÃO HIDRÁULICA EM VELOCIDADE AJUSTÁVEL UTILIZANDO  
MÁQUINAS DE DUPLA ALIMENTAÇÃO:  
VANTAGENS AMBIENTAIS E OPERACIONAIS.

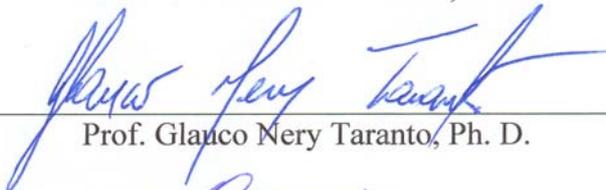
LUIZ MARCELO DE OLIVEIRA SOUZA

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA.

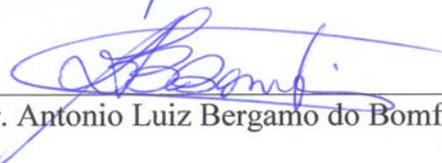
Aprovada por:



Prof. Antonio Carlos Ferreira, Ph. D.



Prof. Glauco Nery Taranto, Ph. D.



Dr. Antonio Luiz Bergamo do Bomfim, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JULHO DE 2005

SOUZA, LUIZ MARCELO DE OLIVEIRA

Geração hidráulica em velocidade ajustável utilizando máquinas de dupla alimentação: vantagens ambientais e operacionais. [Rio de Janeiro] 2005

XI, 107 p.29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Elétrica, 2005)

Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Máquinas de Indução de Dupla Alimentação
2. Geração Hidrelétrica em Velocidade Ajustável
3. Estabilidade Eletromecânica
4. Rendimento e Eficiência
5. Impacto Ambiental

I. COPPE/UFRJ II. Título ( série )

Esta tese é dedicada à minha  
esposa Shirlei, aos meus pais  
Valdomiro e Ivis e aos meus irmãos  
Kátia, Joyce e Ivan.

# Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, por todas as coisas que tem me proporcionado, por todos os obstáculos, que por estar sempre a meu lado, superei. Agradeço a Deus sobretudo por dar-me forças para permanecer no caminho mesmo quando outras alternativas se mostraram muito mais fáceis.

Meus sinceros agradecimentos a minha família que sempre me apoiou em todos os desafios que decidi enfrentar.

Agradecimentos especiais para a minha esposa Shirlei Porto de Souza, pela compreensão de minha dedicação parcial neste momento tão importante de nossas vidas e para o meu irmão Ivan Marcos de Oliveira Souza, por sua ajuda e empenho visando à conclusão deste trabalho.

Aos colegas do curso de mestrado, em especial para o amigo Lenilson Veiga Mattos, pelo incentivo e apoio durante todo o curso.

A ELETROBRÁS, na pessoa do Sr. Luis Yoshihiro Guenka, chefe do Departamento de Engenharia de Transmissão, que gentilmente soube conceder-me a oportunidade de estudo nas horas necessárias.

Ao CEPTEL, através dos Srs. Ricardo Diniz Rangel e Julio César Rezende Ferraz, pelos esclarecimentos acerca da implementação da máquina de dupla alimentação no programa ANATEM.

Finalmente, agradeço ao Prof. Antonio Carlos Ferreira pela orientação e compreensão das dificuldades vivenciadas.

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

GERAÇÃO HIDRÁULICA EM VELOCIDADE AJUSTÁVEL UTILIZANDO  
MÁQUINAS DE DUPLA ALIMENTAÇÃO:  
VANTAGENS AMBIENTAIS E OPERACIONAIS.

LUIZ MARCELO DE OLIVEIRA SOUZA

Julho / 2005

Orientador: Antonio Carlos Ferreira

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta a tecnologia de geração hidrelétrica com velocidade ajustável através da utilização de máquinas de indução de dupla alimentação com conversores no circuito do rotor. Demonstrou-se que a sua integração, observada as características do reservatório e da turbina, pode exercer grande influência na estratégia de operação hidroenergética, podendo minimizar o impacto ambiental ocasionado pela mesma, através da possibilidade de diminuição das suas áreas alagadas. Deu-se destaque ao ganho de flexibilidade adicionado ao sistema de geração de energia, que, de acordo com a nova regulamentação sobre o uso das águas, não possui mais prioridade frente aos outros usos, e desta forma passará a sofrer maiores influências, podendo sofrer aumento do número de restrições hidráulicas. Para o sistema eletromecânico, deu-se ênfase ao aumento da eficiência do processo de geração de energia que se obtém com o adequado ajuste da velocidade coordenado com a queda hidráulica disponível, eliminando-se as perdas por deplecionamento. Mostrou-se que o conversor do circuito rotórico pode controlar a potência da máquina nos quatro quadrantes, inclusive em aproveitamentos reversíveis. Constatou-se, através da simulação dinâmica, que a estratégia de controle dos conversores pode aumentar a estabilidade transitória do sistema com geração em velocidade ajustável nas situações de ocorrência de perturbações no mesmo.

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

ADJUSTABLE SPEED HYDRO GENERATION WITH  
DOUBLY FED INDUCTION MACHINES:  
ENVIRONMENT AND OPERATIONAL BENEFITS.

LUIZ MARCELO DE OLIVEIRA SOUZA

July / 2005

Advisor: Antonio Carlos Ferreira

Department: Electrical Engineering

This work presents the technology of adjustable speed hydroelectric generation by means of doubly fed induction machines with converters at the rotor circuit. When the characteristics of the reservoir and the turbine are maintained, the integration of such technology may have major influence on the strategy of the hydro-generated operation, which can minimize the environmental impact as it may diminish its flooded areas. We highlighted the gain of flexibility added to the energy generation system which, according to the new regulation on the use of water, is not a priority in relation to other uses; because of this, this flexibility will undergo major influence and possibly will have more water restrictions. As for the electromechanic system, we emphasized the higher efficiency of the process of energy generation obtained with the adequate adjustment of speed together with the available water fall, which eliminates the losses by depletion. We showed that the rotor circuit of the converter may control the power of the machine on the four quadrants, including on reversible power plants. By means of dynamic simulations, we concluded that the strategy of control of the converters may enhance the transitory stability of the system with adjustable speed generation when disturbances of the system occurs.

# Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XI</b>
<b>CAPÍTULO 1     INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1     PRINCIPAIS FONTES DE ENERGIA ELÉTRICA .....	2
1.2     O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL .....	2
1.3     GERAÇÃO HIDRELÉTRICA EM ROTAÇÃO FIXA OU AJUSTÁVEL .....	3
1.4     ESTRUTURA DA TESE.....	5
<b>CAPÍTULO 2     TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO HIDRÁULICA .....</b>	<b>7</b>
2.1     TIPOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS .....	8
2.2     TIPOS DE TURBINAS HIDRÁULICAS .....	10
2.2.1     Turbinas de Ação.....	11
2.2.2     Turbinas de Reação .....	12
2.3     ESCOLHA DAS TURBINAS HIDRÁULICAS .....	15
2.4     RENDIMENTOS DAS TURBINAS HIDRÁULICAS .....	16
2.5     O FENÔMENO DA CAVITAÇÃO .....	20
<b>CAPÍTULO 3     USINAS HIDRELÉTRICAS E O MEIO AMBIENTE .....</b>	<b>25</b>
3.1     IMPACTOS AMBIENTAIS .....	27
3.2     OPERAÇÃO HIDROENERGÉTICA DOS RESERVATÓRIOS .....	28
3.3     CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS RESERVATÓRIOS.....	34
3.4     VANTAGENS AMBIENTAIS OBTIDAS COM A ROTAÇÃO AJUSTÁVEL.....	36
<b>CAPÍTULO 4     GERAÇÃO HIDRÁULICA EM VELOCIDADE AJUSTÁVEL .....</b>	<b>40</b>
4.1     TECNOLOGIAS PARA GERAÇÃO EM VELOCIDADE AJUSTÁVEL .....	41
4.1.1     Conexão Unitária – Conexão CC .....	42
4.1.2     Máquinas de dupla alimentação – Conexão CA .....	45
4.2     A MÁQUINA DE INDUÇÃO DE DUPLA ALIMENTAÇÃO.....	51
4.2.1     Aspectos construtivos .....	51
4.2.2     Equipamentos auxiliares.....	53
4.2.3     Modos de operação.....	55

<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>MODELAGEM E SIMULAÇÃO.....</b>	<b>59</b>
5.1	MODELO MATEMÁTICO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO DE DUPLA ALIMENTAÇÃO.....	59
5.2	MODELO NAS VARIÁVEIS DE EIXO ORIENTADO PELO FLUXO DO ESTATOR .....	71
5.3	MODELO PARA OPERAÇÃO EM REGIME PERMANENTE .....	75
5.4	SIMULAÇÃO DINÂMICA .....	80
5.5	ANÁLISE FINAL DAS SIMULAÇÕES .....	99
<b>CAPÍTULO 6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>100</b>
6.1	CONCLUSÕES .....	100
6.2	TRABALHOS FUTUROS .....	101
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS: .....</b>		<b>103</b>

## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Ciclo Hidrológico .....	8
Figura 2.2 - Turbina Pelton .....	11
Figura 2.3 - Turbina Francis.....	13
Figura 2.4 - Turbina Kaplan .....	14
Figura 2.5 - Diagrama de Aplicação das Turbinas Francis, Pelton e Kaplan .....	16
Figura 2.6 - Diagrama Topográfico de uma Turbina Genérica .....	17
Figura 2.7 - Superfície de Potência de uma Turbina Eólica Genérica.....	18
Figura 2.8 - Diagrama Topográfico - Turbina Francis Rápida .....	19
Figura 2.9 - Diagrama Topográfico - Turbina Francis Normal .....	20
Figura 2.10 - Desgaste das Pás de um Rotor de Turbina Francis efeito da Cavitação.....	21
Figura 2.11 - Limites de Operação de uma Turbina Francis Normal .....	24
Figura 3.1 – Características Físicas dos Reservatórios.....	36
Figura 3.2 - Reservatório Espreado .....	38
Figura 3.3 - Reservatório Profundo .....	38
Figura 4.1 - Sistema de Transmissão de Corrente Contínua Convencional.....	42
Figura 4.2 - Sistema de Transmissão de Corrente Contínua por Conexão Unitária Real .....	43
Figura 4.3 - Sistema back-to-back .....	44
Figura 4.4 Máquina Convencional x Máquina de Dupla Alimentação.....	47
Figura 4.5 - Fluxo de Potência no Modo Motor .....	57
Figura 4.6 - Fluxo de Potência no Modo Gerador .....	58
Figura 5.1 - Eixos Magnéticos do Rotor e Estator.....	60
Figura 5.2 - Eixos dq da Transformação de Park .....	65
Figura 5.3 - Eixos dq para Modelo Orientado pelo Fluxo do Estator.....	72
Figura 5.4 - Circuito Equivalente .....	77
Figura 5.5 – Circuito “ T ” Referido ao Estator.....	78
Figura 5.6 - Circuito “ T ” Completo.....	79
Figura 5.7 - Representação da Máquina de Dupla Alimentação .....	81
Figura 5.8 - Esquema de Controle do Conversor 1 .....	83
Figura 5.9 - Esquema de Controle do Conversor 2 .....	84
Figura 5.10 - Esquema de Controle Completo .....	86
Figura 5.11 - Sistema de Potência - Caso 1 .....	87
Figura 5.12 - Degrau na Referência de Velocidade.....	88
Figura 5.13 – Escorregamento do Gerador.....	88
Figura 5.14 - Tensão no Capacitor do Elo CC.....	89
Figura 5.15 - Tensões nas Barras do Gerador e da Usina.....	89
Figura 5.16 - Potência Ativa no Conversor 1 .....	90

Figura 5.17 - Potência Reativa no Conversor 1 .....	90
Figura 5.18 - Freqüência na Barra do Gerador .....	91
Figura 5.19 - Potências no Gerador de Dupla Alimentação .....	91
Figura 5.20 - Sistema de Potência – Caso 2 .....	92
Figura 5.21 - Aplicação e Retirada do Degrau na Referência de Velocidade.....	93
Figura 5.22 – Escorregamento do Motor.....	93
Figura 5.23 – Freqüência da Barra do Gerador .....	94
Figura 5.24 - Potência Reativa no Motor .....	94
Figura 5.25 – Tensão na Barra do Gerador.....	95
Figura 5.26 - Potências no Motor de Dupla Alimentação .....	95
Figura 5.27 - Tensões na Barra do Gerador e no 230 kV .....	96
Figura 5.28 - Status de Operação da Proteção Crow-Bar .....	96
Figura 5.29 – Velocidade de Rotação do Rotor.....	97
Figura 5.30 - Potência Ativa nos Terminais do Gerador .....	97
Figura 5.31 – Freqüência nos Terminais do Gerador .....	98
Figura 5.32 - Potência Ativa nos Terminais do Gerador .....	98

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1- Campo de Aplicação das Turbinas Hidráulicas.....	15
Tabela 3.1 – Restrições Operativas para o Controle de Cheias – Ciclo 2000-2001 .....	31
Tabela 3.2 – Metas de Volumes de Espera – Ciclo 2000-2001 .....	33
Tabela 4.1 - Usinas com Rotação Ajustável em Serviço ou em Construção .....	51
Tabela 5.1 – Parâmetros da Máquina de Indução de Dupla Alimentação .....	80
Tabela 5.2 – Ponto de Operação do Caso 1 .....	87
Tabela 5.3 – Ponto de Operação do Caso 2 .....	92

# Capítulo 1

## Introdução

Atualmente a energia é considerada como um bem básico para a integração do ser humano ou para uma nação inserir-se ao processo de desenvolvimento. É através das oportunidades e alternativas criadas por ela que um indivíduo, uma comunidade ou um país irá desenvolver-se economicamente e assim poderá oferecer acesso aos serviços essenciais buscando a melhoria da qualidade de vida como saneamento, transporte, segurança, educação e assistência de saúde. A geração desta energia, compreendendo todo o processo de captura dos recursos naturais e transformação da fonte primária em energia de uso final, produz impactos ambientais, socioeconômicos e culturais que transformam desde as comunidades locais até as cidades vizinhas aos aproveitamentos energéticos. Por esta razão, todas as usinas de geração de energia, devem ser planejadas e operadas sob a máxima eficiência e confiabilidade, ou seja, a tecnologia empregada em um empreendimento deve agregar o maior desenvolvimento possível, de forma a propiciar o maior retorno com o mínimo de consumo dos recursos naturais.

Levando-se em conta que é no processo de geração de energia elétrica que se promove a maior parte dos impactos e que o uso de diferentes tecnologias determinará diferentes efeitos negativos no meio social e ambiental, é importante observar que a definição do cenário energético de um país está diretamente ligada à análise destes impactos. Isto implica na necessidade de avaliar, obviamente, a disponibilidade das fontes naturais, sejam estas renováveis ou não-renováveis.

Esses impactos podem ocasionar desde a perda de biodiversidade, destruição e alagamento de áreas ecológicas naturais, emissão de gases geradores do efeito estufa e até desalojamento de populações e cidades inteiras.

De toda a energia utilizada, atualmente, no mundo, cerca de 30 a 40% é na forma de energia elétrica, o que indica a grande importância da eletricidade no cenário energético mundial. Além disso, verifica-se também a tendência para o aumento de sua

participação devido, principalmente, a sua grande flexibilidade e confiabilidade operacionais e a sua possibilidade de produção ambientalmente limpa. Para oferecer estas características, os diversos equipamentos e estratégias de controle dos sistemas elétricos são vislumbrados desde a etapa de estudo e planejamento da expansão, tanto na definição das máquinas, equipamentos e seus controles, quanto durante a operação do mesmo, através de estudos e simulações sobre o atual comportamento do sistema frente às perturbações e impactos verificados e previstos pelos estudos de expansão do sistema. Na definição dos equipamentos que serão integrados ou substituídos no sistema elétrico de potência, leva-se em consideração não só as máquinas e controladores já consagrados e em uso em larga escala, como também se avalia a viabilidade de enriquecer o sistema com as últimas tecnologias desenvolvidas e que podem aumentar a qualidade e confiabilidade no fornecimento desta energia.

## **1.1 Principais fontes de energia elétrica**

Diferente da grande maioria dos países desenvolvidos ou em desenvolvimento, o Brasil não sustenta a base da geração de sua energia elétrica na utilização de fontes primárias não renováveis como derivados do petróleo (óleo e carvão), combustíveis radioativos (urânio, plutônio) e gás natural. Esta condição especial deve-se principalmente à grande disponibilidade de fontes hídricas no país e às políticas adotadas nas últimas décadas. A nação possui um perfil preponderantemente hidrelétrico que individualiza o Brasil e oferece uma grande oportunidade para a aplicação da tecnologia que será apresentada neste estudo, seja para o planejamento ou construção de novas usinas ou ainda na repotencialização das usinas atualmente existentes.

## **1.2 O desenvolvimento sustentável**

As diretrizes e as formas de organização da sociedade humana vêm sendo amplamente alteradas em razão da constatação da repetição dos erros cometidos no

passado quanto aos aspectos ecológicos, sociais e políticos. A ocorrência de enormes desastres ecológicos e a existência de populações inteiras sem acesso a energia elétrica ou a outras necessidades básicas, demonstrou que a opção por alternativas ecologicamente predatórias, ou por soluções indicadas pelas disputas e as imposições político-econômicas das grandes potências mundiais, não tinham compromisso com sua manutenção.

Desta forma, contrastando com o pensamento do crescimento infinito e desenvolvimentista, nasceu o paradigma do desenvolvimento sustentável, buscando alterar os atuais sistemas de produção e organização da sociedade humana [24].

Este modelo tem como foco principal o pensamento de que o consumo dos recursos naturais de forma indiscriminada levará, cedo ou tarde, ao seu esgotamento ou simplesmente inviabilizará o seu uso pelas gerações futuras [17].

O setor de energia, grande influenciador dos sistemas de produção, deve então avaliar todas as tecnologias existentes, bem como as fontes primárias disponíveis para, dentre elas incentivar as opções renováveis mais interessantes em termos de custos, impactos sociais e ambientais e, principalmente as mais condizentes com o princípio da sustentabilidade.

### **1.3 Geração hidrelétrica em rotação fixa ou ajustável**

Para interligar as usinas elétricas ao sistema elétrico de potência é necessário que sejam observados os parâmetros de tensão e frequência deste sistema. Esta última exigência, desconsiderando-se pequenas oscilações, somada à utilização clássica de geradores síncronos com acoplamento direto com o eixo da turbina, impõe a operação da turbina hidráulica em velocidade de rotação mecânica constante, sendo a mesma continuamente controlada através de sistemas reguladores de velocidade.

Nesta operação clássica, a turbina hidráulica é projetada para operar sob certa altura de queda e vazão de águas mais frequentemente esperadas, produzindo sob esta condição a máxima potência mecânica possível. Considerando-se que esta é a condição

de maior rendimento da turbina, a operação da usina hidrelétrica será com um rendimento menor que o nominal sempre que as condições hidráulicas não forem as especificadas no projeto. Além das influências hidráulicas, as alterações de carga e contingências no sistema de transmissão ou na própria planta geradora que resultem na variação da potência entregue pela usina, levam também a uma condição de operação com menor rendimento [2,26,27].

Atualmente, em consequência da evolução tecnológica e da redução dos custos da eletrônica de potência, é possível desacoplar a frequência elétrica do gerador da velocidade de rotação mecânica da turbina através da utilização de semicondutores em conversores estáticos em conjunto com geradores de indução duplamente alimentados. Desta forma, é permitido ajustar a rotação da turbina em função das condições operativas, visando operá-la sempre no ponto de maior rendimento possível, e com isso otimizar a operação da usina hidrelétrica.

Diferente da operação clássica, onde a turbina mecânica tem a sua vazão controlada pelo regulador de velocidade em consequência da variação da potência elétrica solicitada pelo sistema, e por esta razão pode operar em condições de perda de desempenho, a alternativa de operação com rotação ajustável, através do controle da velocidade em cerca de  $\pm 15\%$  do seu valor nominal, possibilita maximizar o rendimento do hidrogerador para um grande número de combinações de potência elétrica, vazão e altura de queda d'água.

Embora a operação com velocidade ajustável resulte no aumento da eficiência com consequente otimização da energia gerada pela usina, este não é o único benefício obtido com a adoção desta tecnologia. Os ganhos obtidos devido ao comportamento dinâmico do gerador hidrelétrico em rotação ajustável também serão apresentados. A possibilidade de controle combinado da velocidade de rotação mecânica e frequência de excitação do campo magnético promovem um comportamento dinâmico com a habilidade de intercâmbio de energia entre a “massa girante” da máquina e o sistema de transmissão de potência, e, através desta rápida injeção de potência a máquina contribui para melhorar a estabilidade dinâmica, quando comparada a uma máquina convencional [1,29,30,31]. A instalação de máquinas com estas características promove um maior

amortecimento das oscilações do sistema e aumenta a estabilidade angular, elevando o limite de transmissão de potência, principalmente onde as usinas geradoras são interligadas ao sistema elétrico de potência através de longas linhas de transmissão.

É com vistas a analisar melhor estas vantagens, que se apresenta este estudo. A viabilidade de sua introdução e os benefícios agregados a esta tecnologia promovem um novo conceito na geração de energia hidráulica. Além de ser obter benefícios ambientais com a redução da área alagada, através da operação em cotas inferiores, mantendo a mesma produção de energia de uma usina convencional, tem-se benefícios energéticos com o aumento da eficiência de todo o processo de geração de energia. Por fim, pode-se obter ganhos operacionais, com o aumento da confiabilidade e da estabilidade através da eliminação de restrições operativas devidas aos “gargalos” da transmissão e esquemas de proteção de segurança, oferecendo condições de geração adicional de potência e possível adiamento ou eliminação de investimentos em novas linhas de transmissão, capacitores série, compensadores estáticos ou em outros equipamentos com o objetivo de aumento do limite de estabilidade transitória [33].

## **1.4 Estrutura da tese**

Esta tese foi desenvolvida buscando apresentar a tecnologia de rotação ajustável em usinas hidrelétricas com o uso de máquinas de indução de dupla alimentação, bem como seus ganhos adicionais proporcionados pela desvinculação da rotação mecânica da turbina da frequência elétrica do sistema. Esses ganhos foram quantificados em cada processo, sendo dado maior destaque para os benefícios agregados ao meio ambiente e ao sistema elétrico de potência.

Para facilitar o entendimento, o presente trabalho é composto de 6 capítulos, incluindo esta introdução.

O Capítulo 2 descreve o atual cenário de geração hidrelétrica com as tecnologias e equipamentos utilizados, mostrando os diversos tipos de usinas e turbinas existentes e

os critérios utilizados na escolha das mesmas. Também são descritos os problemas operacionais existentes no uso das turbinas de reação.

O Capítulo 3 evidencia a relação exercida pelas usinas hidrelétricas no meio ambiente, bem como os seus impactos e o estágio atual de consideração da questão da água. É descrita a influência da operação com velocidade ajustável no planejamento e na operação dos reservatórios e as vantagens advindas do seu uso para o meio ambiente.

O capítulo 4 descreve o estado da arte dos aproveitamentos hidrelétricos com velocidade de rotação ajustável, bem como as alternativas existentes para desvincular a velocidade de rotação mecânica da frequência elétrica, com destaque para a máquina de indução de dupla alimentação. São apresentados seus detalhes construtivos e as tecnologias utilizadas nos seus conversores.

O capítulo 5 apresenta a modelagem em regime permanente e dinâmico para a máquina de dupla alimentação, para os seus controles e para os conversores VSI. Através da simulação dinâmica é comprovado o seu comportamento e constatado os ganhos proporcionados para o sistema elétrico de potência

Finalmente, o capítulo 6 apresenta as conclusões objetivas e os benefícios obtidos com a utilização da tecnologia, sejam nos sistemas elétricos, mecânicos, energéticos, hidráulicos ou ambientais. É indicada, ainda, a necessidade de desenvolvimento de novas pesquisas e investigações sobre o custo de implantação da tecnologia em tela.

## Capítulo 2

# Tecnologias de Geração Hidráulica

Devido ao enorme potencial hídrico e às suas grandes dimensões, o Brasil tem a maior parte de sua energia elétrica gerada por usinas hidrelétricas, sendo que no passado estas eram consideradas como a forma de produção de eletricidade mais limpa e menos agressora ao meio ambiente. A construção das grandes usinas exigiu um alto esforço de capitalização que hoje constitui boa parte da dívida externa do país, porém resultou em baixos custos de energia do ponto de vista econômico. Atualmente, entende-se que embora seja uma alternativa de geração com a utilização de combustível renovável, as mudanças na fauna e flora ribeirinhas, com a destruição do meio ambiente e da biodiversidade em áreas submersas, além da emissão do gás metano, constituem-se em enorme impacto ambiental. Do mesmo modo que o decorrente deslocamento de comunidades inteiras, o alagamento das terras aráveis com a eventual substituição da atividade primária da economia local, resultam em profundas mudanças sociais e econômicas.

Diante destes impactos, diversos esforços estão sendo feitos para incentivar a construção de pequenas usinas hidrelétricas ou a busca por novas alternativas para atendimentos locais ou regionais. Dentro desse contexto, é importante destacar a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), que tem como objetivo o aumento da geração de energia elétrica localizada, a partir de fontes eólicas, de pequenas centrais hidrelétricas ou de biomassa.

No entanto, constata-se que a execução de grandes usinas não será abandonada, uma vez que ainda existem muitos aproveitamentos atrativos no país, como por exemplo na região amazônica.

Neste capítulo pretende-se apresentar os principais tipos de usinas hidráulicas, bem como as características e particularidades de cada tipo de turbina dentre as mais

utilizadas. São apresentados também os ganhos de rendimento proporcionados pela velocidade ajustável, e, por fim, as perdas ocorridas em consequência da cavitação.

## 2.1 Tipos de usinas hidrelétricas

Considerando-se que a água, fonte primária de energia para as hidrelétricas, que está presente nos rios, está na realidade percorrendo as diversas etapas do ciclo hidrológico (chuva, escoamento, infiltração e evaporação) conforme mostrado na Figura 2.1. Entende-se que a sua disponibilidade é função das mudanças das variáveis climáticas que conseqüentemente influenciam nas vazões e cotas dos rios.

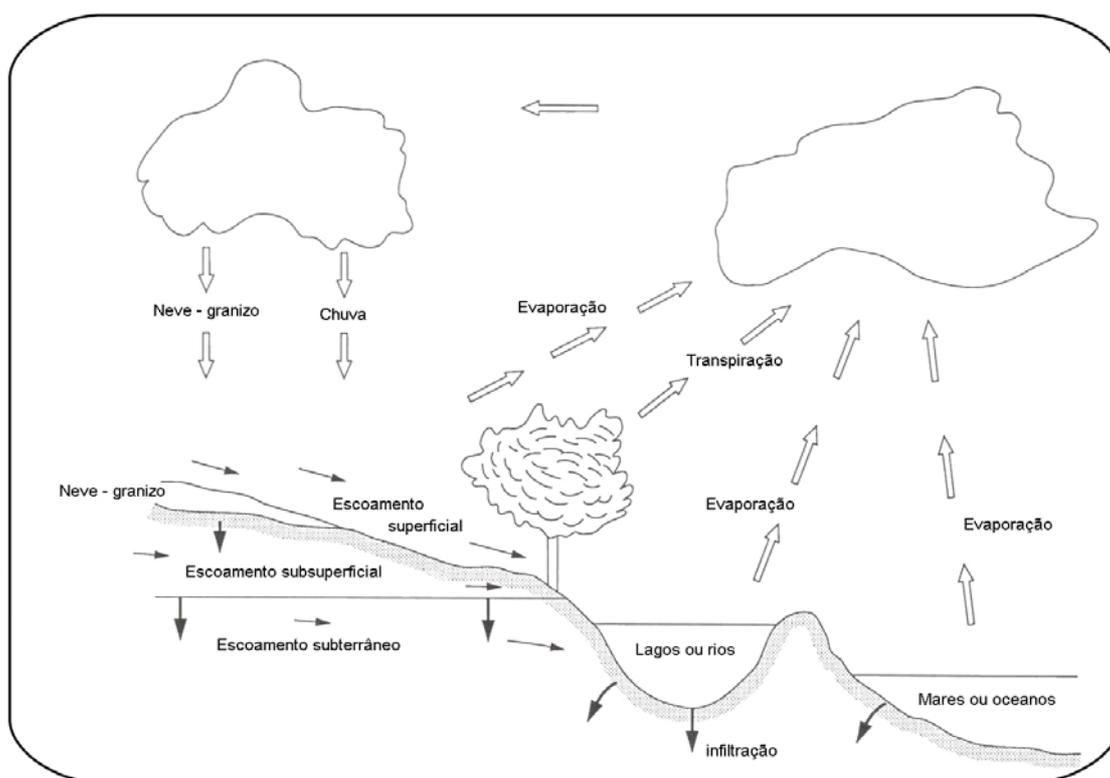


Figura 2.1 - Ciclo Hidrológico

Para permitir que se obtenha um aproveitamento constante, com uma vazão média (vazão regularizada) superior a esta garantida pelo ciclo hidrológico e com uma redução das variações impostas pelas condições climáticas, são construídas as barragens de acumulação para armazenamento da água e utilização mais conveniente do aproveitamento.

A produção de energia dependerá, dentre outros fatores, da vazão de água disponível para movimentar a turbina mecânica, denominada vazão turbinável, que acionará o gerador elétrico. Este por sua vez transformará em energia elétrica a energia mecânica cinética entregue pela turbina. Se o aproveitamento for totalmente voltado para a geração de energia elétrica, toda a vazão regularizada poderá ser turbinada. Por outro lado, em aproveitamentos com uso múltiplo da água, seja para irrigação, navegação, lazer ou abastecimento, por exemplo, a vazão turbinável será apenas uma parte da vazão regularizada.

Concluindo, pode-se demonstrar que quanto ao uso das vazões, as hidrelétricas podem ser classificadas como:

- usinas a fio d'água - não apresentam capacidade de armazenamento relevante e, em geral, dispõe somente da vazão natural proporcionada pelo rio. Caracterizam-se por pequena ou nenhuma variação do nível de água e possuem energia firme coincidente com a energia primária.
- usinas com reservatório de acumulação - grande parte das usinas hidrelétricas brasileiras é provida de reservatórios. Através da estratégia de acumular a água durante o período das cheias para que ela possa ser utilizada nos períodos de estiagem, se obtém a regularização da vazão defluente e o controle da geração elétrica, abastecimento, irrigação e outro usos da água.
- usinas reversíveis - são as usinas que bombeiam, durante o patamar de carga leve, a água de um represamento inferior para um reservatório superior principal e são acionadas para gerar energia durante a carga pesada. Como a energia utilizada no bombeamento não é totalmente recuperada, visto a existência de perdas nos motores/geradores, bombas/turbinas, tubulações e etc, é necessário um bom planejamento para a obtenção de um rendimento econômico na operação total deste sistema. Mesmo assim, estas usinas têm relevância por converterem energia de baixo custo nas horas de baixa demanda em energia de alto custo nas horas de pico, além de representarem uma ótima estratégia para armazenamento de energia, visto que ao contrário de outras formas de energia, a energia elétrica deve ser gerada e

consumida simultaneamente, não sendo possível armazenar uma grande quantidade de energia na forma de eletricidade.

No contexto do desenvolvimento sustentável, onde se buscam melhores formas de gerenciamento dos recursos naturais, as usinas reversíveis representam um papel de destaque quando contribuem para este fornecimento “extra” de energia nos horários de pico mesmo operando sob rendimentos razoáveis. Este estudo mostrará também que a tecnologia de rotação ajustável possui grande vocação para ser utilizada em usinas reversíveis. Devido ao fato de se poder ajustar a velocidade de rotação, aumentar a estabilidade angular e controlar a geração de reativos, as usinas reversíveis agregam muitos benefícios e conseqüentemente aumentam a eficiência nas operações de geração e bombeamento.

## **2.2 Tipos de turbinas hidráulicas**

A máquina primária que realiza o trabalho mecânico de transformação da energia potencial de um aproveitamento hidráulico em energia cinética de rotação é a turbina hidráulica. As turbinas são compostas por pás e rotor, e, quando a água passa por elas, sua energia potencial é convertida e transmitida através da rotação do eixo comum ao gerador elétrico que, por sua vez, converte este movimento em energia elétrica.

As turbinas podem promover torque no seu eixo através da ação dinâmica ou de pressão da água e, por isso, são classificadas em dois tipos. O primeiro tipo é caracterizado pelas turbinas de ação, que transformam a energia potencial de queda em energia cinética através de um ou mais jatos de água em alta velocidade sendo, em seguida, essa energia convertida em energia mecânica no rotor da turbina. Nessas turbinas o escoamento de água ocorre sem a variação da pressão e para tanto elas possuem um rotor com pás ou conchas na sua periferia e uma tubulação de adução que alimenta um ou mais injetores. O segundo tipo é classificado como turbinas de reação, que realizam torque a partir da combinação da ação das energias de pressão e cinética

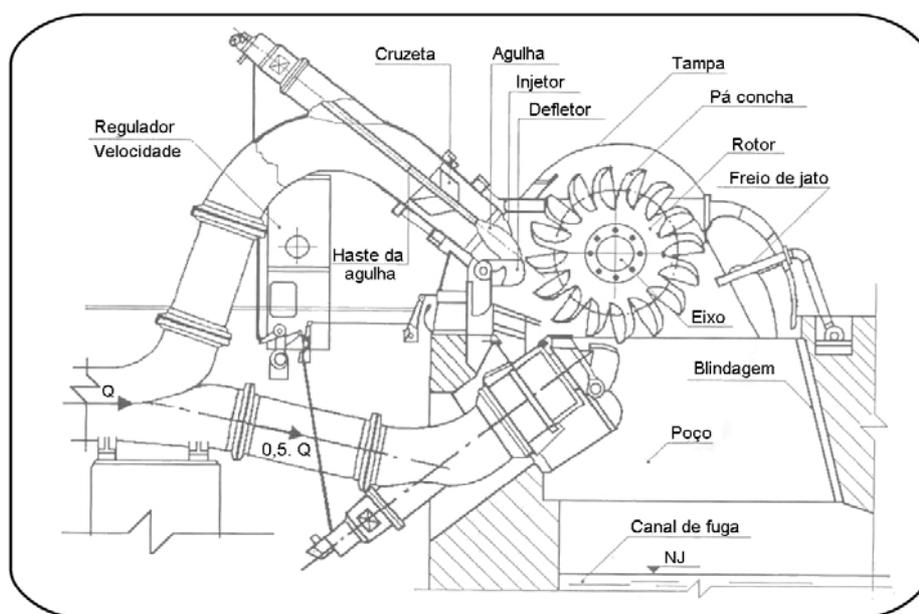
da água em energia mecânica no rotor da turbina. Nessas turbinas o escoamento de água ocorre com variação da pressão [32].

A seguir, serão apresentadas as principais características e aplicações das turbinas mais utilizadas para geração hidráulica, bem como o seu comportamento na operação com velocidade ajustável.

## 2.2.1 Turbinas de Ação

### • Turbinas Pelton

São as mais comuns das turbinas de ação ou impulso e possuem o nome de Lester Pelton, um de seus criadores. Nesta turbina, a energia potencial da água é entregue para as pás através de um conduto forçado que transporta a “massa de água” do reservatório a montante até aos bicos injetores. Estes, por sua vez, direcionam os jatos para as pás ou conchas do rotor, como visto na Figura 2.2. A quantidade de água que atinge a turbina é controlada pela posição de uma agulha localizada no interior do bico injetor. Além disso, utiliza-se um arranjo defletor de água, colocado à frente de cada jato, para desviá-lo, mesmo rapidamente, da turbina em caso de rejeição de carga, para reduzir o torque mecânico sobre o gerador.



Fonte: Macintyre

Figura 2.2 - Turbina Pelton

O controle da vazão turbinada é realizado, portanto pelo ajuste combinado da agulha móvel e o defletor. Como pode ser visto na figura, a elevação do ponto mais baixo do rotor deve receber atenção especial de forma que as conchas fiquem distantes do espelho d'água e possa ser evitado um indesejável efeito de frenagem.

Esta turbina é utilizada em quedas relativamente altas e pequenas vazões, com eixo horizontal para o caso de um ou dois jatos e eixo vertical para um número de jatos de três a seis, alcançando potências que podem chegar a mais de 100 MW por unidade e quedas da ordem de 1900 m.

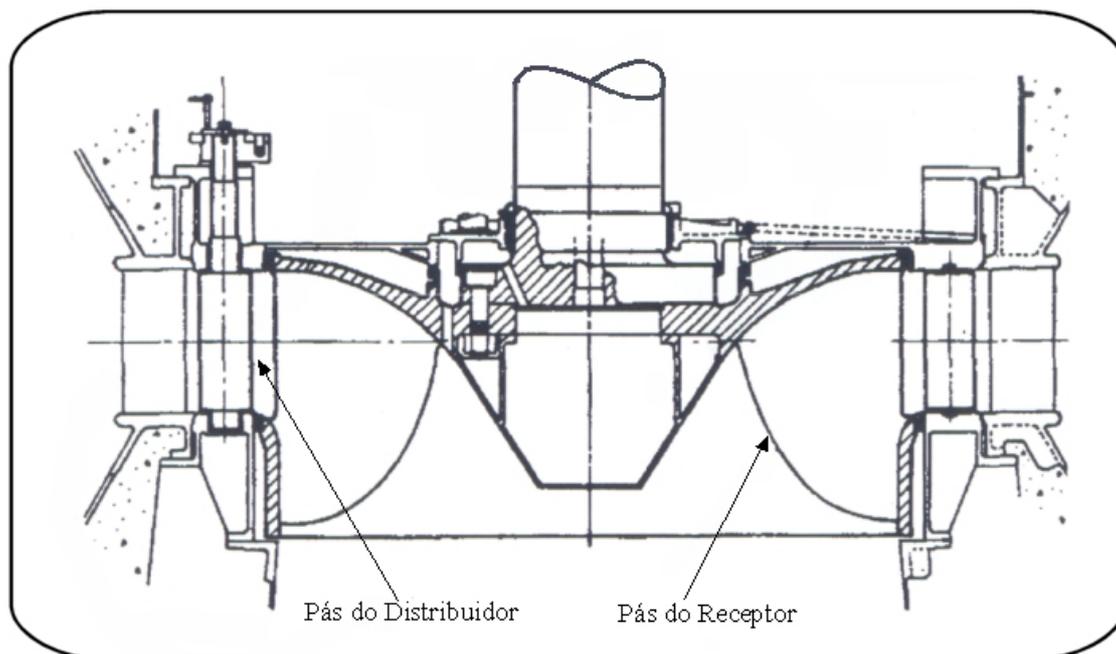
Possui ótimas características de desempenho sob cargas parciais, funcionando suavemente e praticamente sem cavitação até 20% da carga nominal, e mesmo abaixo deste valor quando utilizado um maior número de jatos. Tem maiores vantagens em instalações onde a água possui materiais abrasivos, onde os condutos forçados são longos e o problema do golpe de aríete é crítico.

Para a aplicação com velocidade ajustável, tendo em vista o seu principio de funcionamento e como a vazão dos injetores independe da velocidade de rotação, esta turbina não possui expectativa de ganhos ambientais ou operacionais, não sendo portanto, objeto de pesquisa deste estudo.

## **2.2.2 Turbinas de Reação**

- **Turbinas Francis:**

Foram criadas no século XIX por James Francis e são denominadas turbinas de fluxo misto devido à direção do fluxo da água no seu interior. Possuem um receptor interno ao distribuidor, de modo que a água se aproxima constantemente do eixo ao atravessar o rotor. Nesta turbina, utiliza-se uma caixa espiral em aço ligada em seu lado montante a um conduto forçado. Na periferia interna da caixa espiral, um anel rígido suporta as pás fixas do pré-distribuidor e para variar a vazão é utilizado um mecanismo regulador que orienta as pás que constituem o distribuidor disposto em volta do rotor, como pode ser visto na FIGURA 2.3.



Fonte: Macintyre

**Figura 2.3 - Turbina Francis**

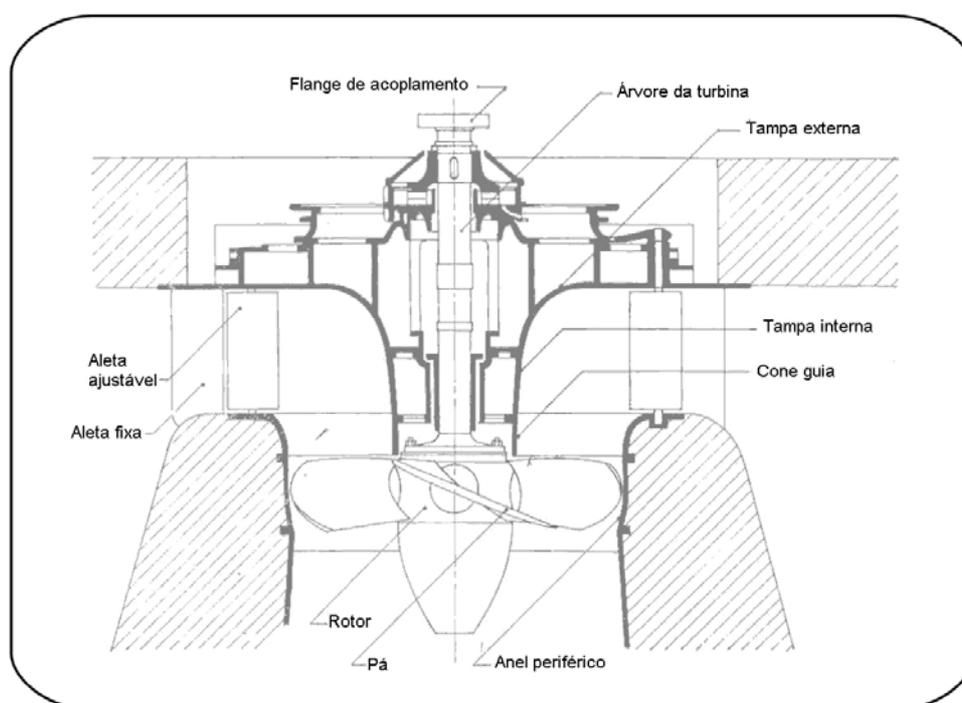
O formato do rotor varia de acordo com a velocidade específica de operação da turbina que são subdivididas em “extra-rápida”, “rápidas”, “normais” e “lentas”, sendo utilizadas em quedas de 20 a 600 m. Estas turbinas utilizam ainda um tubo de sucção para conduzir a água do rotor até o poço e para manter a continuidade da massa líquida em escoamento, aumentando assim a queda hidráulica.

Quanto ao rendimento, estas turbinas possuem ótima característica sob cargas parciais de até 70 % da carga nominal, funcionando ainda adequadamente entre 70 % e 50% da carga, embora com perda progressiva do rendimento.

Para as aplicações com rotação variável, conforme será apresentado mais adiante, estas turbinas são as que apresentam maior potencial de ganhos energéticos e operacionais, sendo que esses ganhos são mais expressivos nas turbinas que trabalham com baixa queda, ou seja, aquelas que operam com alta velocidade específica.

- **Turbinas Kaplan:**

As turbinas a hélice de fluxo axial com passo variável, criadas em 1912 pelo engenheiro Victor Kaplan, são utilizadas em locais com pequenas e médias quedas e grandes descargas. Seu rotor é composto por um cubo com pás em forma de asa de sustentação, cujo número varia de dois a oito. Possuem como grande vantagem em relação às turbinas axiais de pás fixas, conhecidas como turbinas Propeller, exatamente este mecanismo que permite o ajuste da inclinação das pás conforme a variação da descarga e potência sem apreciável variação do rendimento. A Figura 2.4 a seguir apresenta um corte longitudinal em uma turbina Kaplan de eixo vertical.



Fonte: Macintyre

**Figura 2.4 - Turbina Kaplan**

Sob cargas parciais, este ajuste de inclinação das pás, comandado através do regulador de velocidade, promove a manutenção do alto rendimento.

Para as aplicações com rotação ajustável, haja vista que estas turbinas já possuem esse mecanismo de ajuste de rendimento, não são esperados ganhos energéticos que justifiquem a sua implantação, porém, conforme será mostrado adiante,

sua operação em velocidade ajustável poderá trazer benefícios para o sistema elétrico de potência.

## 2.3 Escolha das turbinas hidráulicas

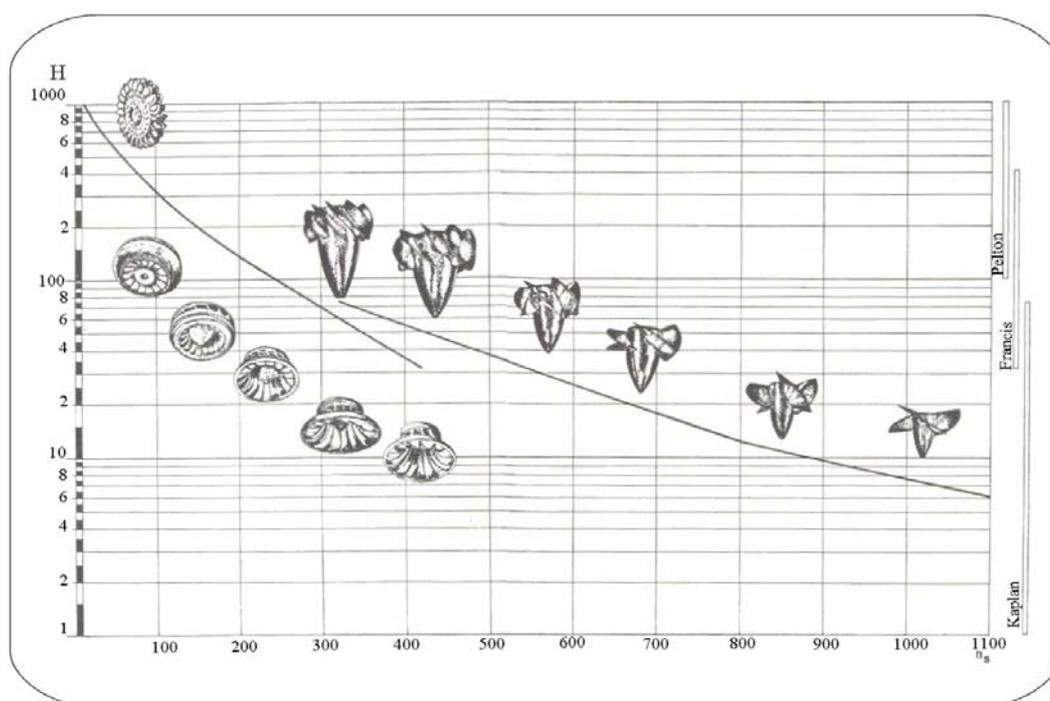
A determinação de qual tipo de turbina será utilizado em um certo aproveitamento hidráulico é definida a partir dos valores mais frequentemente esperados para a queda hidráulica, descarga ou potência e principalmente de acordo com o número de rotações por minuto projetado para a sua operação. Teoricamente não existem limitações para o emprego de cada um dos tipos de turbina, assim como também não é impossível construí-las para operar sob qualquer valor de velocidade. Porém, devido às particularidades existentes em cada tipo de instalação, existe sempre um modelo mais adequado que funcionará com um maior rendimento em comparação aos outros.

Para ilustrar, conforme o apresentado anteriormente, a Tabela 2.1, a seguir, apresenta o campo de aplicação das turbinas conforme a sua velocidade de rotação.

**Tabela 2.1- Campo de Aplicação das Turbinas Hidráulicas**

Tipo de Turbinas		Rotação r.p.m.	Altura H (m)
Pelton	1 jato	18 – 25	800 – 400
	2 jatos	26 – 35	800 – 400
	4 jatos	40 – 50	400 – 100
	6 jatos	72 – 90	400 – 100
Francis	Muito lenta	55 – 70	600 – 200
	Lenta	71 – 120	200 – 100
	Normal	121 – 200	100 – 70
	Rápida	201 – 300	70 – 25
	Extra-Rápida	301 – 450	25 – 15
Kaplan, Bulbo, Tubulares, Straflo	8 pás	250 – 320	70 – 50
	7 pás	321 – 430	50 – 40
	6 pás	431 – 530	40 – 30
	5 pás	534 – 620	30 – 20
	4 pás	624 e acima	30

Em resumo, a Figura 2.5 a seguir mostra a prática adotada pelas empresas para a determinação de qual tipo de turbina deve ser utilizada em cada aproveitamento.



Fonte: Macintyre

**Figura 2.5 - Diagrama de Aplicação das Turbinas Francis, Pelton e Kaplan**

Verifica-se através da mesma, que as principais turbinas podem ser classificadas da seguinte forma

- Pelton – utilizadas em altas quedas e velocidade de rotação mais baixa.
- Francis – utilizada em alturas de queda e velocidade de rotação médias.
- Kaplan – utilizadas em baixas quedas e altas velocidades específicas.

## 2.4 Rendimentos das turbinas hidráulicas

Para quantificar os possíveis ganhos energéticos da alternativa de rotação ajustável, torna-se necessária uma avaliação dos rendimentos da turbina hidráulica

operando sob a condição de velocidade de rotação fixa em comparação com o seu desempenho sob a possibilidade de operação em velocidade de rotação ajustável.

Para isto, utiliza-se como base um diagrama que relaciona o seu rendimento em função da velocidade de rotação e da descarga, ou potência. Este diagrama, conhecido como “diagrama topográfico” ou ainda como “curvas de colina” da turbina é apresentado na Figura 2.6.

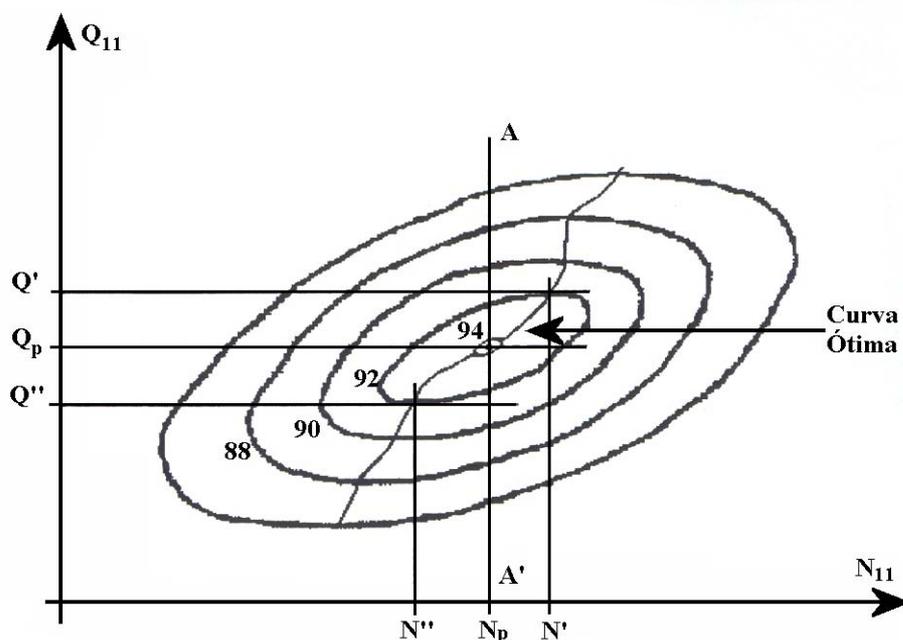
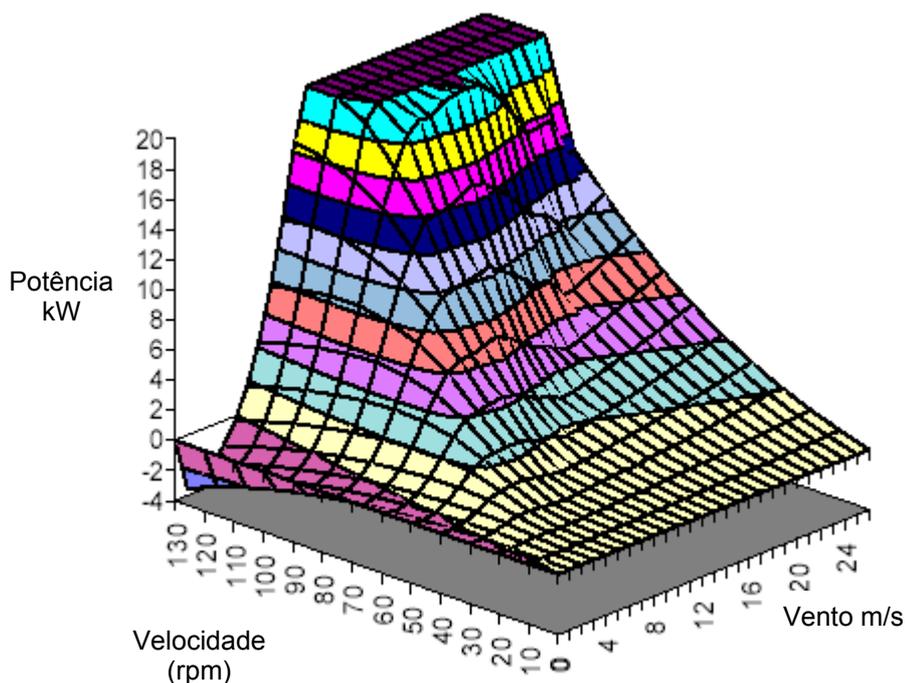


Figura 2.6 - Diagrama Topográfico de uma Turbina Genérica

Vale destacar que esta característica das turbinas hidráulicas é muito semelhante ao que é verificado nas turbinas eólicas. Este diagrama topográfico possui um análogo que é utilizado em turbinas eólicas, onde define-se um coeficiente ótimo conhecido como  $\lambda$  que relaciona a velocidade do vento com a velocidade de rotação desejada para que a turbina eólica maximize a geração de potência [12,20,34]. A Figura 2.7 a seguir apresenta esta curva.



**Figura 2.7 - Superfície de Potência de uma Turbina Eólica Genérica**

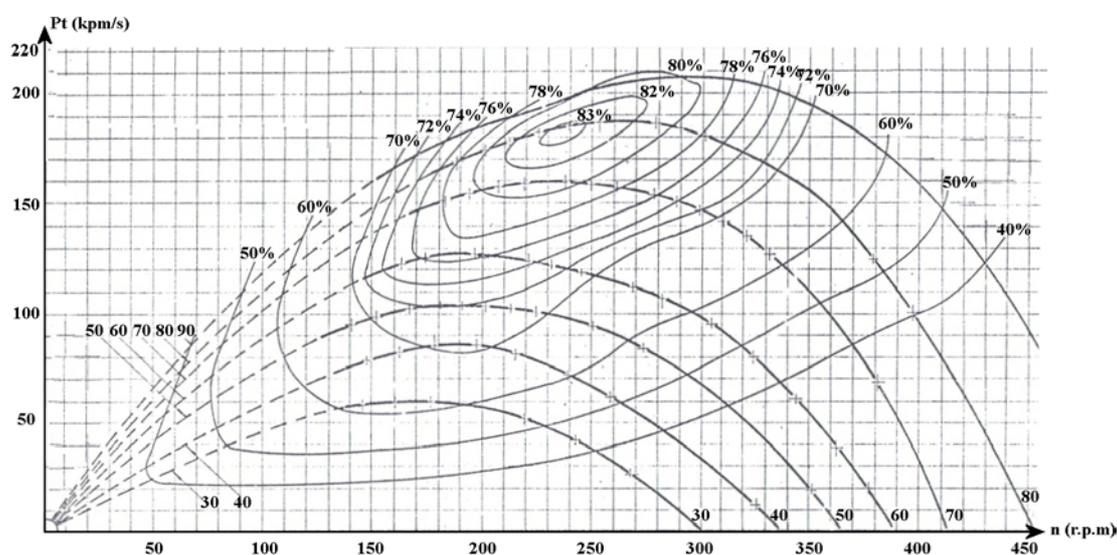
Voltando à análise da turbina hidráulica através da Figura 2.6, e investigando o princípio de rotação fixa, tem-se que para uma determinada queda hidráulica disponível, com a manutenção da rotação na velocidade síncrona ( $N_p$ ) e tomando-se como base uma descarga ou potência entre  $Q'$  e  $Q''$ , verifica-se a variação no rendimento da turbina como função única da vazão, isto é, sempre que a vazão ou potência desenvolvida na turbina não for a especificada no projeto ( $Q_p$ ), ela ocorrerá sempre sob um rendimento inferior (pontos de operação  $Q'N_p$  e  $Q''N_p$ ).

Por outro lado, para esta mesma queda hidráulica, porém considerando a liberdade de se operar sob as velocidades de rotação mais convenientes, pode-se caminhar sobre a “curva ótima” da turbina e assim permitir que a potência desenvolvida por ela seja entregue sob uma condição de rendimento superior à anterior (pontos de operação  $Q'N'$  e  $Q''N''$ ).

Esta constatação, por si só, já demonstra a potencialidade dessa desvinculação. No entanto, o emprego da velocidade ajustável não traz os mesmos benefícios para todos os tipos de turbinas, visto que as máquinas que operam em baixas quedas, entre 30m e 100m tem os seus diagramas topográficos mais inclinados e por isso possuem

maiores benefícios que máquinas projetadas para altas quedas. A 300m as curvas de colina são circulares e por isso a velocidade ajustável não traz nenhuma melhora substancial, pois, nestes casos, pequenos ajustes na velocidade não proporcionam deslocamentos suficientemente grandes no ponto de operação da turbina para atravessar diversas regiões de rendimento, não havendo assim aumentos significativos no seu rendimento [36].

A Figura 2.8 abaixo apresenta o diagrama topográfico de uma turbina Francis rápida, e a Figura 2.9 a seguir apresenta a característica de uma turbina Francis normal.



**Figura 2.8 - Diagrama Topográfico - Turbina Francis Rápida**

Observa-se que na turbina Francis rápida, as suas curvas de colina são inclinadas e justamente por esta razão este tipo de turbina possui maior possibilidade de apresentar ganhos com a rotação ajustável. Na figura seguinte, devido a turbina operar em quedas superiores e velocidade inferiores, seus possíveis ganhos para a rotação ajustável são menores.

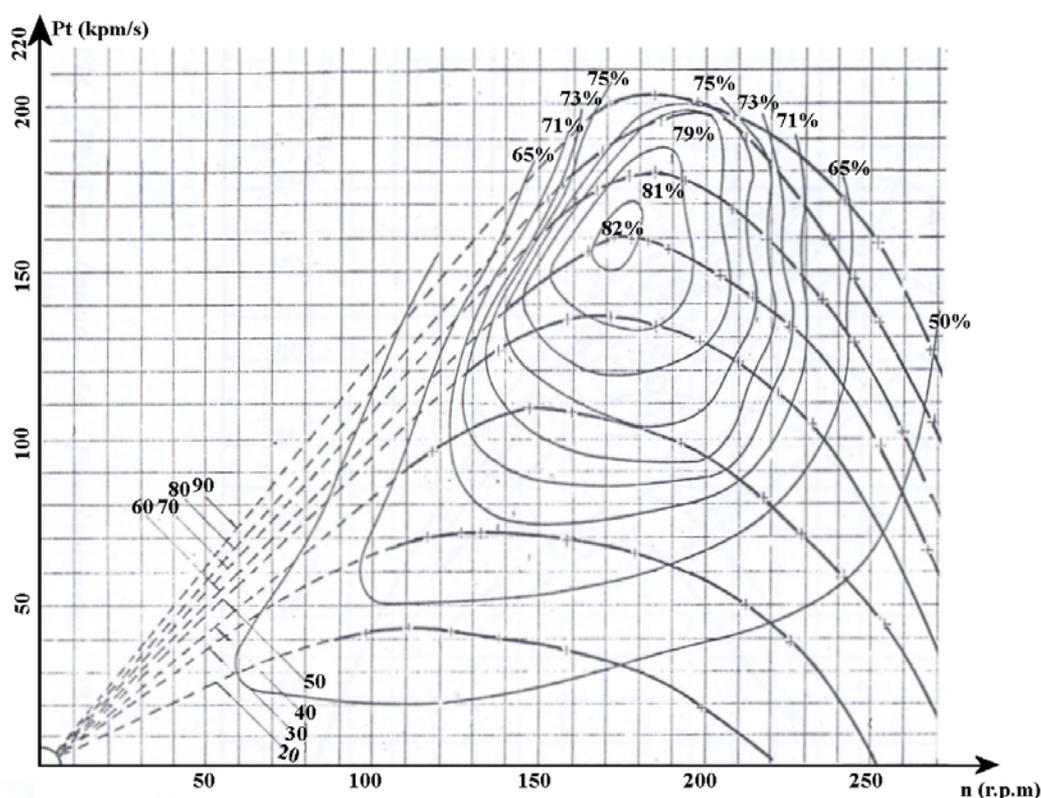


Figura 2.9 - Diagrama Topográfico - Turbina Francis Normal

Pelos estudos realizados em [25,27] verifica-se que o ajuste ótimo da velocidade de rotação da turbina hidráulica pode representar até cerca de 4% de ganho na geração de energia. Individualmente, este valor pode não parecer atrativo, porém quando aplicado em toda a vida útil de uma usina hidrelétrica torna-se bastante representativo.

Para concluir, vale informar que para agregar este ganho na operação da usina, deve-se inserir um sinal no regulador de velocidade que virá de um sistema que tem como base a determinação desta velocidade rotação ótima da turbina em função da queda hidráulica disponível e potência, ou vazão, para todas as condições operativas.

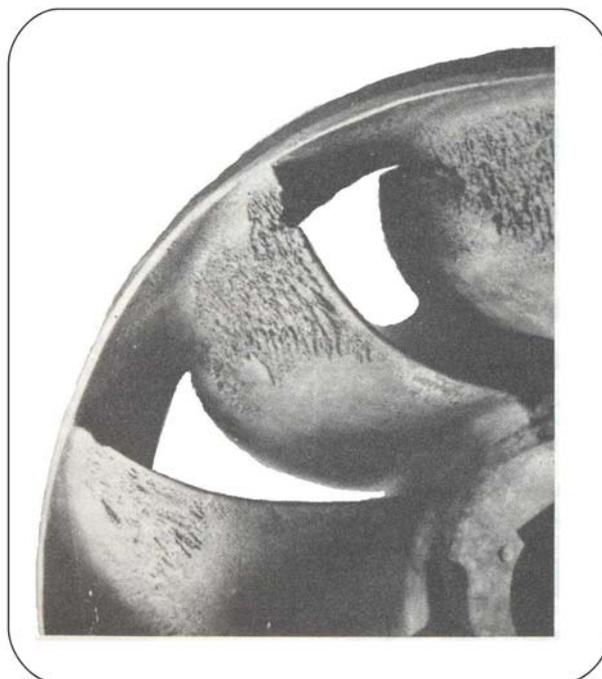
## 2.5 O fenômeno da cavitação

Ocorre nas turbinas hidráulicas de reação, principalmente as Francis e Kaplan de altas velocidades, sendo vista como uma ação destrutiva que além de reduzir a eficiência do processo de conversão de energia, pode representar grandes dispêndios

com reparos das máquinas, além da diminuição da confiabilidade e conseqüente flexibilidade operacional do sistema.

Este fenômeno se manifesta devido ao escoamento da água em alta velocidade, que baixa a sua pressão absoluta até o valor da pressão de vapor à temperatura da água, provocando a formação de pequenas bolsas ou cavidades, no interior das quais o líquido se vaporiza e transforma o fluxo em uma mistura dessas duas fases da água. A partir desse ponto, conduzido pela corrente líquida, esse fluxo atinge regiões de elevada pressão e entra em colapso com a condensação do vapor e o seu retorno ao estado líquido [5].

Quando a colisão das bolhas de vapor ocorre nas superfícies metálicas da turbina, as forças oriundas desta energia de implosão produzem percussões e choques hidráulicos que desagregam elementos de material de menor coesão, formando pequenos orifícios que no início dão à superfície um aspecto corroído e dentilhado, e que com o avanço do fenômeno pode provocar até o arrancamento de pedaços de metal das turbinas, conforme pode ser visto na Figura 2.10.



Fonte: Macintyre

**Figura 2.10 - Desgaste das Pás de um Rotor de Turbina Francis efeito da Cavitação**

Somado a isto, existe também a ocorrência de vibrações e ruídos excessivos, que podem comprometer a operação e até mesmo inviabilizar a geração de energia em determinados patamares de carga baixa ou em algumas configurações de queda hidráulica disponível, devido às variações dos níveis de montante e jusante.

Portanto, para determinação dos limites operacionais da unidade e para a definição da altura de posicionamento do rotor da turbina, é utilizado, dentre outros métodos empíricos ou não, o cálculo de um coeficiente que quantifica as condições dinâmicas e estáticas que podem conduzir a uma condição de cavitação. Este fator é denominado coeficiente de Thoma de projeto e tem a seguinte expressão:

$$\sigma_p = (H_a - H_v - H_s) / H,$$

Onde:  $H_a$  - altura da coluna de líquido correspondente à pressão atmosférica;  $H_v$  - altura da coluna de líquido correspondente à pressão de vapor,  $H_s$  - altura da coluna de líquido correspondente à calagem da turbina hidráulica e  $H$  - altura da coluna de líquido.

As turbinas são então projetadas de forma que o coeficiente de cavitação de projeto seja superior ao coeficiente de cavitação crítico determinado através dos ensaios em laboratórios especializados utilizando modelos em escala reduzida. Porém, em consequência das imprecisões decorrentes do efeito de escala e das diferenças das condições de laboratório das situações reais de funcionamento, como a viscosidade, a rugosidade e a qualidade da água, os fabricantes adotam ainda um fator de segurança.

Este fator relaciona os coeficientes de projeto e o crítico, sendo que por volta de 1960, os projetistas adotavam 50%, sendo reduzido para 15% em 2000 e atualmente os fabricantes já estão trabalhando com 10% de segurança.

É importante observar que a adoção deste fator de segurança implica diretamente na determinação da cota de instalação da turbina, conforme a relação custo/benefício do afastamento da probabilidade de ocorrência da cavitação e dos gastos envolvidos na escavação e posterior concretagem da usina.

Vale destacar que o fenômeno da cavitação é bastante complexo basicamente por envolver a erosão produzida pela interação de um fluido com uma superfície sólida, e principalmente pelo comportamento hidrodinâmico da implosão das estruturas de vapor, com posterior emissão de ondas de choque sobre as superfícies metálicas da turbina. Sua previsão tem sido objeto de inúmeras pesquisas, sendo que uma solução abrangente que pudesse ser implementada em novos projetos ainda não foi encontrada.

Para ilustrar o tamanho do problema da cavitação, levantamentos realizados pelos CEPEL em [4] mostram que em 1991 os gastos com reparos em turbinas brasileiras foram da ordem de US\$ 13.000.000,00 (mão de obra e materiais), sendo que as perdas de faturamento resultante dessas intervenções somam cifras muito maiores que essas. Além disso, o impacto na confiabilidade do sistema devido à indisponibilidade dos geradores pode acarretar uma situação de operação em que o sistema fique mais suscetível a grandes ocorrências que conseqüentemente determinam grandes perdas financeiras para a população.

A filosofia de operação com velocidade ajustável, além de possibilitar o ajuste ótimo para cada patamar de carga ou queda hidráulica disponível, permite ainda mapear os melhores pontos de operação, evitando assim o aparecimento de cavitação através do ajuste da velocidade de rotação. Devido aos efeitos de escala, mesmo após terem sido projetadas e corretamente ensaiadas, algumas pequenas falhas do projeto como a ocorrência de ressonâncias hidráulicas em alguns pontos de operação poderão ser evitadas, sem a necessidade de intervenções extras ou a imposição de restrições nos limites da turbina.

A turbina hidráulica é intrinsecamente uma máquina de fluxo de velocidade variável, visto que a sua velocidade varia com a altura da queda hidráulica. Porém, para aplicações em aproveitamentos hidráulicos, devido à necessidade de manutenção da frequência elétrica do sistema associada à utilização de geradores síncronos, sua faixa de operação foi eliminada.

No entanto, verificou-se em [37] que existem limites para a operação em velocidade ajustável definido por uma forma diferente de cavitação. De acordo com a

Figura 2.11 esta ocorre em um limite mínimo de velocidade devido ao descolamento da água na entrada das pás do rotor, determinado pela linha *a*, no lado de sucção e num limite máximo de velocidade devido ao descolamento da água na entrada das pás do rotor, determinado pela linha *c*, no lado de pressão. Existe ainda o problema do aparecimento de trança no tubo de sucção da turbina, determinado pela linha *b*.

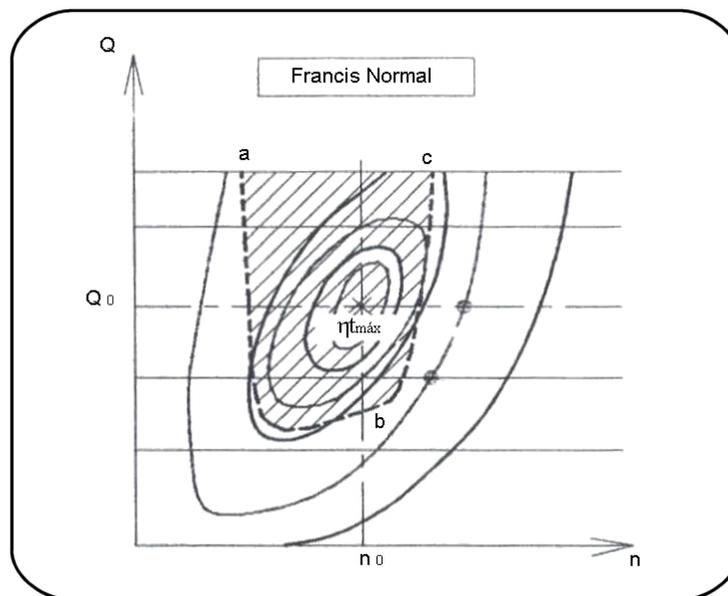


Figura 2.11 - Limites de Operação de uma Turbina Francis Normal

## Capítulo 3

# Usinas Hidrelétricas e o Meio Ambiente

A água é fundamental para a vida humana e essencial para diversos ciclos biológicos em nosso planeta. Porém, apesar da aparente abundância, de toda a água disponível e em condições de ser explorada, física e economicamente pelo homem, 97% encontra-se armazenada no subsolo, restando somente 3% distribuídas em bacias hidrográficas. Além de ser utilizada para o abastecimento humano e de animais, é ainda usada no saneamento, transporte, lazer, irrigação e finalmente na geração de energia através dos aproveitamentos hidrelétricos.

Essa multiplicidade de usos e os impactos por eles gerados fazem com que a água seja uma das maiores questões a ser resolvida pelos governos e, por isso, segundo especialistas, ainda será o grande motivo de disputas no futuro. No tocante à estratégia para o estabelecimento de um desenvolvimento sustentável, a questão da água é de suma importância, uma vez que as decisões realizadas para satisfazer a necessidade da “geração presente” não deve afetar a capacidade das “gerações futuras” de também satisfazerem suas próprias necessidades [24].

O Brasil detém quase 15% da reserva hídrica do planeta, possuindo os maiores recursos mundiais superficiais e subterrâneos. Porém, como ainda não explorou os aproveitamentos hidráulicos disponíveis na região amazônica, utiliza somente um quarto de todo o seu potencial. Mesmo assim, nossa matriz energética se mostra altamente dependente da energia hídrica, com cerca de 90% de participação da energia proveniente dos rios.

Como a exploração desta energia deu-se com a mesma velocidade das elevadas taxas de crescimento econômico ocorridas a partir da década de 70, a regulamentação para planejar e legislar a integração entre os diversos usos da água ainda não estava em prática, e desta forma, a grande maioria dos reservatórios das hidrelétricas do sistema interligadas foram projetadas e construídas com vistas exclusivas para a geração de

energia elétrica. A dissociação entre os projetos de geração de energia hidrelétrica e outros usos da água é tão grande que temos exemplos onde deixou-se de aproveitar a possibilidade da pesca e do lazer. Temos reservatórios em que não foram realizados estudos para geração de energia, além de outros onde os aproveitamentos não podem ser usados em sua totalidade por restrições ambientais do uso da água que não foram consideradas no projeto.

As primeiras regulamentações ambientais elaboradas no Brasil, Resoluções nº 002/85 e 001/86 editadas pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA, estabeleceram as exigências da execução e aprovação dos “Estudos de Impacto Ambiental” (EIA) e respectivo “Relatório de Impacto Ambiental” (RIMA) para o licenciamento de atividades modificadoras do meio ambiente, porém nem essas foram capazes de modificar a situação sobre o uso múltiplo da água. Somente em 1988, a Constituição Federal estabeleceu que a água é um bem de domínio público pertencendo aos Estados e à União, e, com a aprovação da Lei nº 9333 em 1997, instituindo a Política Nacional de Recursos Hídricos [7], o uso múltiplo da água passou a ser considerado como um dos fundamentos para a gestão dos recursos hídricos no Brasil. Em face da importância dessa lei, em 2000 foi aprovado pelo Congresso Nacional, o projeto de lei de criação da Agência Nacional das Águas – ANA, vinculada ao Ministério do Meio Ambiente [8], com a função principal de implementar a política dos recursos hídricos, integrando o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos através da criação de um canal de articulação entre os agentes públicos e privados e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), objetivando planejar e promover ações no sentido de prevenir ou minimizar os efeitos das secas e inundações e definir as condições de operação dos reservatórios, visando garantir o uso múltiplo dos recursos hídricos.

Neste capítulo pretende-se apresentar a interação dos aproveitamentos hidráulicos com o meio ambiente, mostrando os seus impactos, bem como os princípios e características que norteiam a operação hidroenergética de seus reservatórios. Por fim são apresentados os benefícios que podem ser incorporados ao meio ambiente com a introdução do princípio da geração em velocidade ajustável.

### **3.1 Impactos ambientais**

Considera-se impacto ambiental, “qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente afetem a saúde, a segurança e o bem estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota, as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; a qualidade dos recursos ambientais” [8]. Portanto, qualquer obra de engenharia apresenta, invariavelmente, maior ou menor impacto ambiental. As usinas hidrelétricas, em particular, por serem obras de grande porte, agridem os ecossistemas com a construção de obstáculos nos leitos dos rios, que podem levar ao alagamento de sítios arqueológicos, de florestas, incluindo habitats naturais de animais silvestres, chegando até à submersão de cidades inteiras. Adicionalmente, a decomposição da biomassa inundada presente no reservatório, emitirá gás metano e poluirá a água com o excesso de matéria orgânica.

De forma a mensurar essas alterações, os estudos de impacto ambiental apresentam o seu diagnóstico sob dois níveis de abrangência e detalhamento, conhecidos como: “Área diretamente afetada”, composta pelas áreas dos municípios atingidos pelo reservatório e pela sua área de segurança (cota de segurança) e “Área de influência”, sendo composta pelas áreas dos municípios que fazem parte da bacia hidrográfica contribuinte ao aproveitamento [5,6].

Claramente, pode-se concluir que os maiores impactos ocorrem na área alagada, denominada “diretamente afetada” e, por isso, qualquer medida que tenha por objetivo a redução do impacto ambiental provocado pela construção de uma hidrelétrica, deverá ser direcionada para esta área.

Entende-se que a tecnologia de rotação ajustável, conforme será demonstrado adiante, pode proporcionar a redução dos seus impactos, atuando justamente na redução da sua área de alagamento, mantendo porém, a mesma capacidade de geração de potência elétrica. Isto significa que com menores interferências no meio ambiente, essa tecnologia pode viabilizar a mesma geração de energia com uma cota de alagamento inferior à que foi estabelecida na etapa de projeto, quando não foi considerado o uso da

mesma. No caso de usinas existentes, a tecnologia de rotação ajustável é mais um instrumento a ser utilizado nas obras que visam repotencializar as antigas usinas e assim aumentar a eficiência de todo o processo de conversão de energia.

Para otimizar o seu uso e aumentar as vantagens de sua integração, diversas características físicas do reservatório e da turbina, somadas com as estratégias de operação hidroenergética exercidas pelo ONS em conjunto com a ANA devem ser analisadas, tendo em vista que estas exercem grande influência nos ganhos advindos da possibilidade de rotação ajustável.

Segundo as características mecânicas da turbina, conforme mostrado anteriormente, o ajuste da velocidade poderá exercer maior ou menor influência na vazão turbinada, ou até mesmo não exercê-la, sendo que como nas turbinas Francis de alta rotação a vazão cresce com o aumento da rotação, esta possui especial vantagem em instalações de baixa queda. Na época das cheias, com a diminuição da altura de queda hidráulica, a velocidade pode ser ajustada para um maior valor que corresponderá a uma maior vazão, mantendo a mesma potência nominal. Deste modo, com a capacidade de engolimento maior pode-se exercer um controle adicional na operação do reservatório.

Para os demais fatores, como estratégias de operação hidroenergética e características dos reservatórios, devido à riqueza de informações necessárias para o seu entendimento, serão objetos centrais dos próximos itens.

### **3.2 Operação Hidroenergética dos Reservatórios**

Conforme as características físicas apresentadas por cada aproveitamento hidrelétrico que tem o seu despacho integrado ao sistema interligado (dados atemporais), o ONS, como agente responsável pelo planejamento, supervisão e controle da operação do sistema eletroenergético nacional, tem a responsabilidade de traçar a estratégia mais adequada para a sua operação, de forma a otimizar o sistema como um todo. Porém, não são utilizados somente esses critérios, sendo ainda necessário adquirir os dados climáticos e meteorológicos mundiais, como o fenômeno de ENSO ( El Niño

South Oscillation ) – conhecidos como El Niño e La Niña e os dados locais de cada bacia hidrográfica.

De posse desses dados atuais, somados com a previsão de carga, a disponibilidade de geração e com uma base de dados histórica de vazões, o ONS realiza diversos estudos e simulações no sentido de encontrar a melhor forma de maximizar a disponibilidade hidroenergética e minimizar a necessidade de geração térmica. Logicamente, existem restrições de natureza elétrica e hidráulica que não participam como variáveis neste processo e que somente serão inseridas em uma etapa posterior, vislumbrando o planejamento de curto prazo (mensal ou semanal).

Neste ponto, quando o sistema era regido pela “antiga” regulamentação, período no qual o sistema elétrico se desenvolveu e a maioria dos reservatórios foram projetados e construídos somente para a geração de energia, estes eram subtilizados e independentes de outros usos que, quando existiam, tinham a sua disponibilidade associada ao estado de operação hidroenergética atual do reservatório. Estes outros usos não exerciam qualquer influência na estratégia ou nos critérios da operação, ou seja, obras que realizaram profundas mudanças no meio ambiente e nas vidas de muitos habitantes, tinham como função exclusiva a geração de energia elétrica.

Esta concepção, voltada para atender, com raras exceções, apenas aos objetivos locais e setoriais da economia, com os custos alocados aos respectivos setores, foi a que predominou historicamente no nosso país. Os principais fatores que dificultaram a concepção de aproveitamentos de recursos hídricos de uso múltiplo, conforme já foi mencionado, foi a ausência de planos setoriais de legislação específica.

No entanto, como a implantação dos reservatórios proporcionou uma considerável regularização das bacias hidrográficas, fazendo com que áreas que eram freqüentemente inundadas passassem a ser protegidas e utilizáveis, embora ainda sujeitas a um risco, as populações e cidades ribeirinhas se encorajaram e passaram a se aproximar da calha do rio, desenvolvendo outros usos para água, além de utilizarem estas áreas para fins diversos (pasto e agricultura).

Esta atitude provocou inicialmente uma mudança da forma de operar estes reservatórios, ou seja, ao objetivo inicial de geração de energia dos aproveitamentos hidrelétricos, veio somar-se as restrições impostas pela forma desordenada com que as bacias hidrográficas foram ocupadas e pelos obstáculos que foram construídos nas suas planícies de inundação.

Conseqüentemente, apesar da maioria dos reservatórios terem sido construídos com a finalidade exclusiva de geração de energia e de seus projetos considerarem somente a necessidade de amortecimento de cheias para a segurança da própria barragem, sua operação teve de ser adaptada para auxiliar na prevenção contra as cheias e inundações das cidades sujeitas a esta calamidade. Isto é, o setor elétrico passou a contribuir com o poder público e as comunidades, na tentativa de evitar-se a ocorrência dessas catástrofes, sendo que na maioria dos casos estas só se tornaram possíveis devido à falta de políticas de ocupação e uso do solo.

Para efetuar o controle das cheias, o setor elétrico passou então a prever a disponibilidade de volumes vazios nos reservatório, capazes de absorver parcelas determinadas das afluições para evitar, com um risco prefixado, que fossem causados danos à jusante. Porém, estabeleceu-se desta forma um conflito de interesses, e o planejamento da operação procurou minimizá-lo ao máximo, através de uma alocação criteriosa de espaços vazios para o controle das cheias, chamados “volumes de espera”, para proteção de restrições a jusante, ou “rebaixamento de nível” para não agravar as restrições de montante.

A Tabela 2.1 apresenta a título de exemplo as restrições operativas consideradas para o controle das cheias, constantes do Plano Anual de Controle de Cheias do ONS – ciclo 2000-2001

**Tabela 3.1 – Restrições Operativas para o Controle de Cheias – Ciclo 2000-2001**

Bacia	Local da Restrição	Usina	Tipo	Empresa
Grande	Adotada na usina cid.Rib.Vermelho	Camargo/Itutinga	jusante	CEMIG
	Áreas rib/balsa	Camargo/Itutinga	Distante da usina	CEMIG
	Casa de força	Furnas	jusante	FURNAS
	Áreas urbanas	M. de Moraes	jusante	FURNAS
	Áreas ribeirinhas	Jaguará	jusante	CEMIG
	Ponte rodoviária	Volta Grande	jusante	CEMIG
	Ponte/usina	Porto Colômbia	jusante	FURNAS
Paranaíba	Acesso à usina	Marimbondo	jusante/ montante	FURNAS
	Cidade Itumbiara	Emborcação	jusante	CEMIG
	Ponte a jusante	Itumbiara	jusante	FURNAS
Tietê	Cid.Pirap.B.Jesus	São Simão	jusante	CEMIG
	Rodovia	Pirapora	jusante	EPAULO
	Áreas ribeirinhas	Rasgão	jusante	EPAULO
	Cid.B.Bom./naveg	Porto Góes	jusante	EPAULO
Paraná	Áreas ribeirinhas	Barra Bonita	jusante	CESP
	Usina Piraju	Jupiá	jusante	CESP
Paranapanema	Pontes/usina	Jurumirim	jusante	CESP
	Áreas ribeirinhas	Chavantes	jusante	CESP

No entanto, até o estabelecimento do novo marco regulatório do uso das águas, este problema poderia ser resolvido com a geração de energia figurando como o objetivo principal a ser maximizado, sujeito às restrições exercidas pelos outros usos ou pelo controle de cheias. Porém, a partir da criação da ANA e com a conseqüente constituição dos Comitês de Bacias, os diferentes setores usuários dos recursos hídricos passaram a ter igualdade do direito de acesso à água, tendo como única exceção a situação de escassez, quando a prioridade do uso é o abastecimento público e a dessedentação de animais.

Dessa forma, o crescimento da demanda por água para os mais variados usos, gera uma constante situação de conflito de interesses de setores diversos e que devem ser mediados através de articulação da Superintendência de Usos Múltiplos – SUM, da Agência Nacional de Águas.

Como exemplo, vale destacar a atuação da ANA na mediação do conflito de interesses ocorrido na ocasião do racionamento de energia de 2001, quando o ONS apresentou a proposta de se utilizar o “volume morto” da Usina de Ilha Solteira como

medida do plano B do governo para gerar energia caso as metas do racionamento não fossem alcançadas.

Neste plano, o ONS considerou como uma reserva estratégica para a geração de energia, a água armazenada no Canal de Pereira Barreto, que não servia para esta finalidade, mas para manter a navegabilidade da hidrovia Tietê-Paraná. O plano previa o fechamento do canal, que interliga os reservatórios de Ilha Solteira e de Três Irmãos, aumentando a produção energética dessas usinas, mas interrompendo o transporte hidroviário por aproximadamente cinco anos, sendo três para a reposição da água e dois para que a via voltasse a ser utilizada como anteriormente. A ANA apurou que esta interrupção da hidrovia provocaria um prejuízo de US\$ 4 bilhões às empresas e pessoas que dependem de sua atividade, além de colocar em risco mais de 4 mil empregos diretos. Com isso, a agência mostrou que o prejuízo seria muito maior que o benefício trazido com a geração, que equivalia a 25 % do consumo da região sudeste em um mês. Dessa forma a medida passou a ser a terceira opção do plano B, ficando após as medidas de decreto de feriados às segundas-feiras e de maior limitação de consumo pelas indústrias, que inevitavelmente seriam tomadas caso o racionamento não tivesse atingido os seus objetivos.

Na definição dos valores ótimos dos volumes de espera a serem alocados nos aproveitamentos, o ONS leva em consideração além dos aspectos hidrológicos, os riscos de déficits de suprimento e da necessidade de geração térmica futura. Para a escolha da alternativa, a metodologia consiste em se admitir várias hipóteses de valores de volumes de espera para os diversos reservatórios, correspondentes a períodos selecionados de retorno das cheias e simular a operação do sistema interligado para cada uma destas hipóteses, objetivando minimizar os riscos enunciados.

A Tabela 3.2 apresenta as metas de volumes de espera (km<sup>3</sup>) para alguns reservatórios da bacia do rio Paraná para o controle das cheias, constantes do Plano Anual de Controle de Cheias do ONS – ciclo 2000-2001

Tabela 3.2 – Metas de Volumes de Espera – Ciclo 2000-2001

Período	Volume Total (km <sup>3</sup> )	Reservatórios (km <sup>3</sup> )			
		Furnas	Nova Ponte	Itumbiara	São Simão
04/11/00 a 10/11/00	12,510	0,703	0,197	1,019	1,564
11/11/00 a 17/11/00	12,810	0,857	0,240	1,242	1,907
18/11/00 a 24/11/00	12,930	0,859	0,241	1,244	1,910
25/11/00 a 01/12/00	13,920	1,127	0,252	1,301	1,998
02/12/00 a 08/12/00	18,240	2,035	0,307	1,952	2,438
09/12/00 a 15/12/00	19,860	2,162	0,323	2,510	2,565
16/12/00 a 22/12/00	20,191	2,053	0,336	2,641	2,566
23/12/00 a 29/12/00	18,656	1,983	0,301	2,398	2,347
30/12/00 a 05/01/01	18,510	1,983	0,293	2,119	2,321
06/01/01 a 12/01/01	17,191	1,893	0,270	2,119	2,056
13/01/01 a 19/01/01	16,917	1,814	0,263	2,085	2,035
20/01/01 a 26/01/01	16,272	1,716	0,249	1,964	1,972
27/01/01 a 02/02/01	14,187	1,518	0,222	1,740	1,689
03/02/01 a 09/02/01	12,728	1,283	0,240	1,591	1,521
10/02/01 a 16/02/01	11,836	1,207	0,190	1,464	1,418
17/02/01 a 23/02/01	10,241	1,011	0,170	1,274	1,204
24/02/01 a 02/03/01	9,456	0,860	0,159	1,200	1,136
03/03/01 a 09/03/01	8,449	0,790	0,142	1,091	1,046
10/03/01 a 16/03/01	7,106	0,647	0,111	0,881	0,862
17/03/01 a 23/03/01	6,240	0,478	0,098	0,666	0,777
24/03/01 a 30/03/01	4,950	0,294	0,082	0,485	0,653
31/03/01 a 06/04/01	3,640	0,203	0,057	0,345	0,452
07/04/01 a 13/04/01	2,490	0,155	0,044	0,225	0,345
14/04/01 a 20/04/01	0,930	0,052	0,014	0,075	0,115
21/04/01 a 27/04/01	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Dentro desse cenário, a tecnologia de geração com velocidade ajustável apresenta uma flexibilidade que irá auxiliar na sua integração com os outros usos da água e nos casos em que for necessário o “rebaixamento de nível” ou a alocação de um “volume de espera”

O ajuste coordenado da altura de queda da turbina com a sua velocidade de rotação, não permite que ocorram as chamadas “perdas por deplecionamento” que diminuem o rendimento da turbina mecânica, visto que nos aproveitamentos de velocidade fixa com uso de máquinas síncronas, as mesmas são projetadas para operar sob certa altura de queda e vazão mais freqüentemente esperadas. É por esta razão, que sempre que se impõe uma operação hidroenergética adversa, a usina trabalha sob um rendimento inferior àquele para o qual foi projetada.

Desta forma, a rotação ajustável amplia a faixa de operação da usina, permitindo ser viável a sua operação mesmo em baixas cargas.

Para demonstrar os recursos implementados nos reservatórios das usinas do sistema elétrico de forma a permitir a sua operação em condições adversas ou não, serão apresentados alguns aspectos técnicos da sua caracterização física.

### **3.3 Características físicas dos reservatórios**

Os reservatórios têm por finalidade acumular parte das águas disponíveis nos períodos chuvosos para compensar as deficiências nos períodos de estiagem, exercendo um efeito regularizador das vazões naturais.

Em geral, os reservatórios são formados por meio de barragens implantadas nos cursos d'água. Suas características físicas, em especial a capacidade de armazenamento, dependem sobretudo das características topográficas do vale no qual está inserido.

Um reservatório pode ser descrito, do ponto de vista físico, por seus níveis e volumes característicos. Estes elementos são descritos a seguir.

#### **Nível d'água Mínimo Operacional**

O NA mínimo operacional corresponde à cota mínima necessária para a operação adequada do reservatório. Esta é a cota que define o limite superior do volume morto e o limite inferior do volume útil do reservatório. Normalmente, o NA mínimo operacional encontra-se acima do limite superior da estrutura de tomada d'água, de forma a evitar a formação de vórtices na entrada da tomada.

#### **Volume Morto**

O volume morto corresponde à parcela do volume total do reservatório inativa ou indisponível para fins de captação de água. Corresponde ao volume do reservatório compreendido abaixo do NA mínimo operacional.

### **Nível d'água Máximo Operacional**

O NA máximo operacional de um reservatório corresponde à cota máxima permitida para a operação normal do reservatório. Geralmente, este nível coincide com a crista do extravasor ou com a borda superior das comportas do vertedor. O NA máximo operacional define o limite superior do volume útil do reservatório.

### **Volume Útil**

O volume útil de um reservatório corresponde ao volume compreendido entre os níveis d'água mínimo operacional e máximo operacional. Este é o volume efetivamente destinado à operação do reservatório, ou seja, ao atendimento das diversas demandas de água. Deve considerar, portanto, as perdas por evaporação e por infiltração do solo, quando estas forem significativas.

### **Volume de Espera**

O volume de espera, ou volume para controle de cheias, definido anteriormente, corresponde à parcela do volume útil do reservatório destinada ao amortecimento de ondas de cheia, visando ao atendimento às restrições à jusante ou à montante. Estas restrições são, em geral, ditadas pelo comprometimento da infra-estrutura existente, como pontes, rodovias ou áreas urbanas.

O volume de espera é variável de acordo com a época do ano, uma vez que a probabilidade de ocorrência de precipitações intensas varia ao longo do período hidrológico.

### **Nível d'água Máximo Maximorum**

O NA máximo maximorum de um reservatório corresponde à sobrelevação máxima do nível d'água, medida a partir do NA máximo operacional, disponível para a passagem de ondas de cheia.

## Crista do Barramento

A cota da crista do barramento é definida a partir de uma sobrelevação adicional ao NA máximo maximorum denominada borda livre (em inglês, free-board), destinada a impedir que as ondas formadas pelo vento ultrapassem a crista da barragem e, ainda, garantir uma segurança adicional a eventuais transbordamentos sobre a crista em condições excepcionais.

Na Figura 3.1 a seguir, estão esquematizados os níveis e volumes característicos de um reservatório.

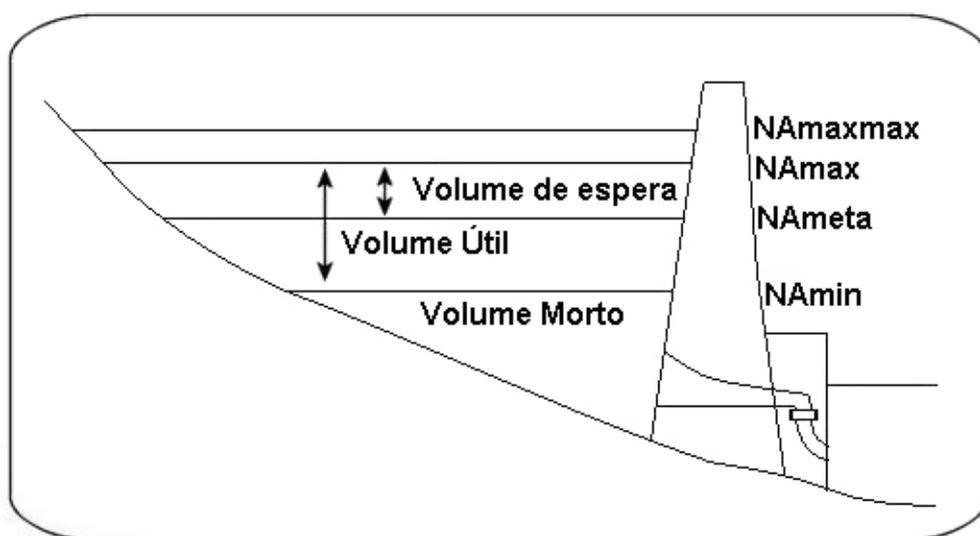


Figura 3.1 – Características Físicas dos Reservatórios

## 3.4 Vantagens ambientais obtidas com a rotação ajustável

Evidentemente, para que a integração da tecnologia de rotação ajustável possa trazer benefícios ambientais, sua maior influência tem de ser sobre a área alagada, ou área diretamente afetada.

Levando-se em conta a questão ambiental, o ganho energético anteriormente apresentado pode ser aplicado de duas maneiras distintas.

1. Gerar a mesma energia com menor quantidade de água: com um reservatório de menor capacidade e menor área de alagamento busca-se extrair a mesma energia, ou
2. Gerar mais energia com a mesma quantidade de água: com um mesmo reservatório busca-se extrair uma maior quantidade de energia.

Pode-se ainda pensar em uma solução de compromisso entre as duas alternativas pois, dependendo de cada caso, a área a ser alagada pode já estar aprovada ou pode ser justamente a pendência para a aprovação de um projeto. Verifica-se que na região amazônica, devido as suas características particulares, esta área pode tomar dimensões muito grandes que podem até inviabilizar o empreendimento, como no caso do projeto do CHE Belo Monte que está passando por mais uma revisão no sentido de promover a redução da sua área de alagamento. Particularmente para este aproveitamento, a solução que está sendo indicada, entre outras, é a de se construir dois canais de adução que possibilitariam uma grande redução neste alagamento.

Por isso, para se obter esses ganhos ambientais, deve-se também observar a característica topográfica do reservatório, determinada basicamente pela curva cota-área-volume. Ela mostra a relação entre a altura do nível d'água e as respectivas áreas e volumes correspondentes, identificando se o mesmo possui uma propriedade de uma bacia mais espreada ou mais profunda. Esta curva vai quantificar a redução da área alagada em relação à redução da cota do reservatório.

Para ilustrar a primeira opção, sendo viável manter a mesma geração de energia com menor quantidade de água, a redução da cota máxima do reservatório resultará uma barragem de menor altura e conseqüentemente com menor custo de construção. Além disso, nesses casos a área alagada será menor, principalmente se o aproveitamento estiver situado em uma bacia espreada. Esse fato, além de representar uma redução de custos em termos de desapropriação, reduz de modo significativo seu o impacto ambiental.

Outra possibilidade, ainda adotando a primeira opção consiste na redução conjunta da cota máxima do reservatório e do seu nível mínimo operativo, reduzindo assim o valor do seu volume útil e conseqüentemente o valor do seu volume morto,

definido pela tomada d'água para o acionamento das turbinas. Entretanto, essa eventual redução deve ser cuidadosamente avaliada pois pode influenciar no maior acúmulo de sedimentos no fundo do reservatório.

A Figura 3.2 apresenta este ganho de redução da área alagada quando aplicado a um reservatório espraiado, enquanto que a Figura 3.3 ilustra o caso de um reservatório profundo.

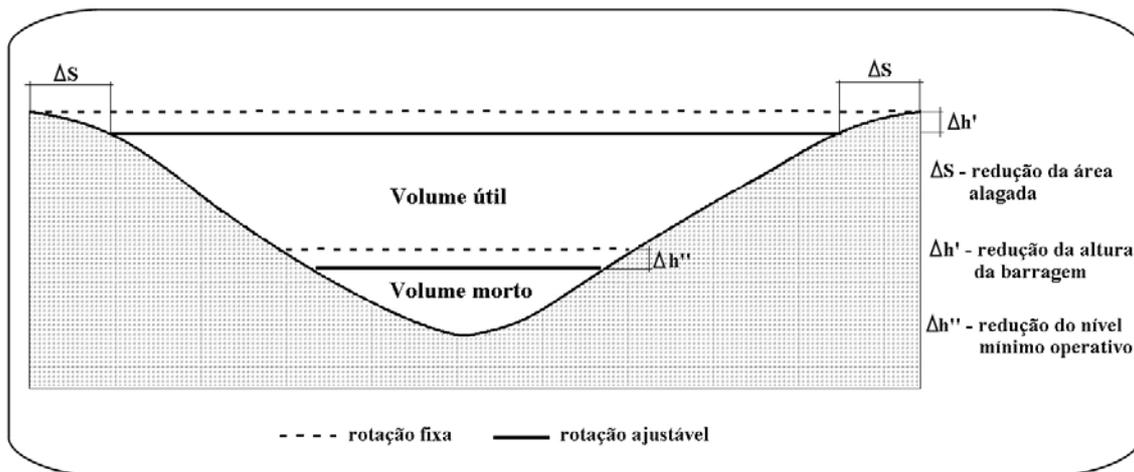


Figura 3.2 - Reservatório Espraiado

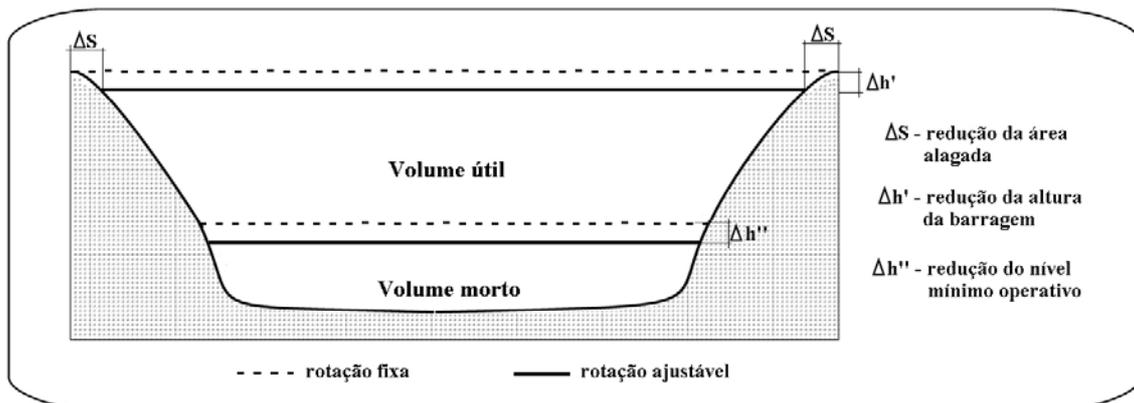


Figura 3.3 - Reservatório Profundo

Como exemplo, dentre os estudos realizados em [27], foi verificado que para a Usina Hidrelétrica Cachoeira Portela, situada no Pará, atingiu-se uma redução de 12,3% da área alagada, com a redução de apenas 2m da cota. Isto foi obtido sem permitir a

redução da capacidade de geração do aproveitamento. Vale salientar que neste estudo foi admitida uma variação de 20% na velocidade de rotação da turbina.

## Capítulo 4

# Geração Hidráulica em Velocidade Ajustável

A geração de energia elétrica para um sistema interligado de potência, realizada a partir de aproveitamentos hidráulicos em conjunto com turbinas hidráulicas, seja na forma de armazenamento ou através da vazão natural proporcionada pelos rios, foi tradicionalmente projetada, construída e operada sob critérios e controles que mantinham a velocidade de rotação mecânica da turbina em um valor fixo. Este princípio, logicamente relacionado com a necessidade de se manter a frequência elétrica constante, se devia à utilização clássica de geradores síncronos diretamente acoplados aos eixos das turbinas.

Esta relação de compromisso levou ao desenvolvimento de equipamentos que possibilitaram que a máquina síncrona, embora com a necessidade de funcionamento em velocidade de rotação constante, pudesse funcionar como um gerador elétrico movido por um processo de aproveitamento de energia intrinsecamente sazonal. Por isso, merecem destaque a atual engenharia dos reguladores de velocidade e a engenharia de projetos de turbinas para aproveitamentos hidráulicos.

Os reguladores de velocidade desempenham papel fundamental na estabilidade dos sistemas de potência, quer no regime permanente ou em regime transitório, exercendo a manutenção de velocidade angular constante através da atuação sobre o fluxo da água que aciona a turbina. São compostos por sistemas hidráulicos e pneumáticos que recebem comandos do sistema de controle e regulam a posição das palhetas diretrizes dispostas em volta do rotor da turbina. Vale ressaltar que conforme constatado anteriormente, sendo a turbina Francis a turbina que mais agrega ganhos na aplicação da velocidade ajustável, a partir deste ponto sempre que se referir a uma turbina entende-se ser do tipo Francis a não ser que seja explicitado o contrário.

No tocante as turbinas hidráulicas, às particularidades próprias dos aproveitamentos hídricos, tais como a sazonalidade de vazões e as diretrizes da operação hidroenergética, conforme demonstrado no capítulo anterior, determinaram o

seu desenvolvimento a uma situação de compromisso com relação à eficiência energética. Seus projetos são concebidos para garantir a eficiência máxima em diversos pontos de operação esperados, sejam eles devidos a diferentes condições de carga elétrica, de vazão e/ou de alturas de queda d'água disponíveis. A solução atual vai além do projeto com base na avaliação estatística dos valores mais freqüentemente esperados, sendo verificado na literatura [36] que algumas alterações no projeto da turbina conseguem minimizar o efeito da perda de eficiência devido ao afastamento do ponto de operação nominal.

Vale salientar que a turbina mecânica é uma máquina de velocidade variável, e na sua operação com velocidade fixa em condições de altura de queda hidráulica, despacho elétrico e vazão diferentes dos valores nominais, sempre resultará em uma redução da eficiência do processo de conversão de energia mecânica.

Mesmo com essas inovações, é evidente que o sistema elétrico de potência exerce restrições na forma de operação do sistema eletromecânico de geração hidráulica, sendo que em consequência dos avanços na área de eletrônica de potência, atualmente existem alternativas que eliminam estas influências e possibilitam realizar esta conversão de energia desvinculando-se a velocidade de rotação mecânica da turbina da freqüência elétrica do sistema elétrico.

As principais tecnologias atualmente desenvolvidas são apresentadas a seguir.

#### **4.1 Tecnologias para geração em velocidade ajustável**

A evolução tecnológica pela qual passou a eletrônica de potência nos últimos anos, possibilita hoje, a fabricação de componentes semicondutores com crescente capacidade de corrente e suportabilidade a tensões, viabilizando a produção de equipamentos conversores, capazes de realizar o acoplamento de consideráveis potências, mesmo submetidas a freqüências diferentes.

Esta possibilidade permite que sejam desenvolvidas duas opções para a geração em velocidade ajustável, seja através da sua aplicação sobre o estator da máquina ou

ainda sobre o rotor da mesma. Dessa forma, as suas condições específicas e vantagens ou desvantagens existentes em cada tipo de conexão, serão apresentadas separadamente.

#### 4.1.1 Conexão Unitária – Conexão CC

O princípio básico da conexão unitária gerador-conversor consiste na utilização de máquinas síncronas diretamente conectadas a pontes conversoras CA-CC, sem a necessidade de um estágio de transformação anterior, ou seja, utiliza o princípio de aplicação da conversão eletrônica sobre o estator da máquina [25].

Nesta configuração, o conversor de potência deve ser projetado para conduzir toda a capacidade do gerador, o que já prejudica e limita a sua aplicação devido ao seu custo. Por outro lado, a adoção desta alternativa, está muito relacionada com a viabilidade de transmissão em corrente contínua, e por esta razão, a sua avaliação é feita em comparação ao uso de sistemas convencionais de transmissão em corrente contínua CCAT, apresentado de forma simplificada na Figura 4.1.

Em comparação com este sistema, o esquema de conexão unitária elimina a necessidade de um barramento CA comum para as máquinas, o uso de um transformador elevador e dos filtros CA.

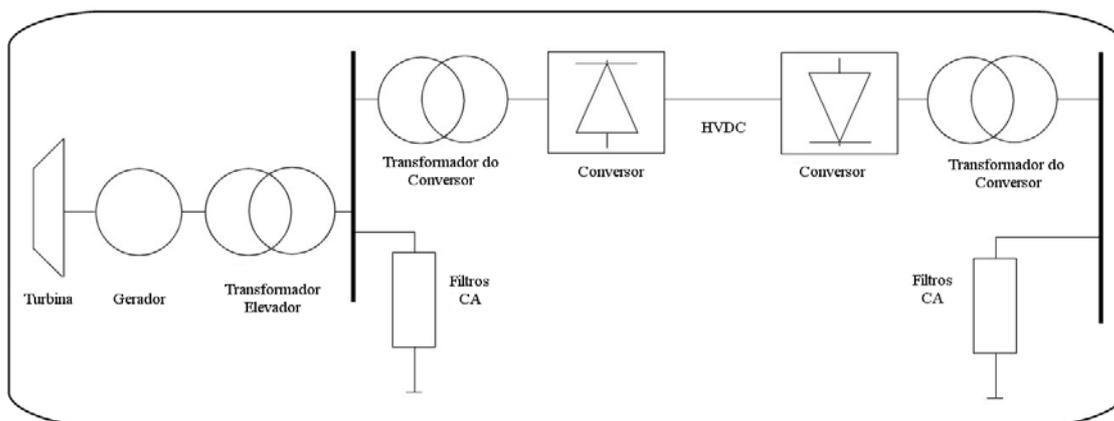
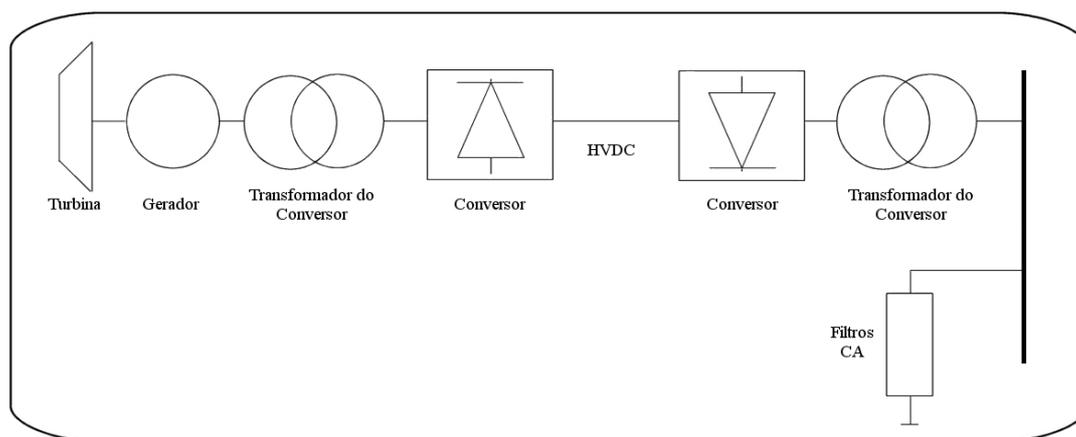


Figura 4.1 - Sistema de Transmissão de Corrente Contínua Convencional

No sistema convencional, as subestações retificadoras / inversoras podem ser compostas por uma ou mais conversoras por pólo. Os transformadores conversores,

com enrolamentos secundários defasados de  $30^\circ$  para pontes de 12 pulsos, são colocados entre o barramento de corrente alternada e a conversora. Finalmente, bancos de filtros são conectados ao barramento CA para absorver os harmônicos de corrente gerados pelo processo de retificação. Neste sistema, cada conjunto turbina-gerador é conectado a um transformador elevador, ligado ao barramento CA.



**Figura 4.2 - Sistema de Transmissão de Corrente Contínua por Conexão Unitária Real**

Esta conexão que está apresentada na Figura 4.2 é conhecida também como conexão unitária real, sendo que existem ainda outras duas configurações, denominadas como conexão em grupo e conexão híbrida, apresentando maior complexidade e visando atender a requisitos como porte do aproveitamento e características físicas da instalação. Por esta razão possuem diferentes desempenhos em relação à construção, manutenção, flexibilidade e custo, apesar de manterem o mesmo princípio de ligação.

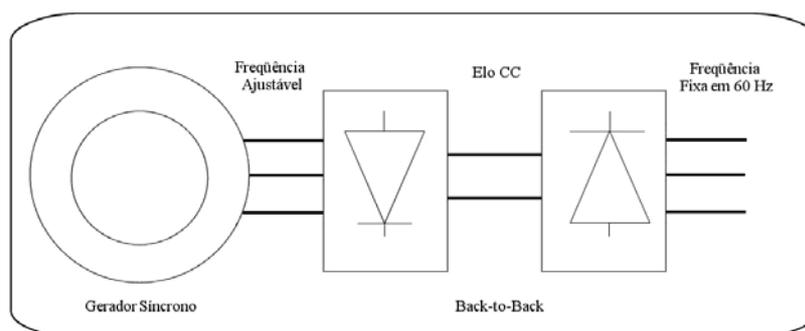
Historicamente, a conexão unitária surgiu como aplicação dedicada ao atendimento de cargas localizadas a grandes distâncias dos pontos de geração. Naturalmente, foi uma evolução dos sistemas de transmissão de corrente contínua convencionais, e, no Brasil, foi objeto de vários estudos [25,27] que tinham como objetivo definir a viabilidade econômica dos aproveitamentos hidráulicos existentes na região Amazônica.

Devido às suas características particulares, os rios da região amazônica possuem uma pequena capacidade de acumulação e regularização, além de apresentarem grandes afluências nos períodos de hidraulicidade favorável, isto porque são rios de planície,

adequados para a navegação fluvial e por isso não apresentam grandes quedas. Conseqüentemente, são inadequados para aproveitamentos energéticos convencionais com velocidade de rotação fixa, onde as turbinas mecânicas operariam com baixa eficiência durante todo o período de baixa hidraulicidade, ou, de outra forma teriam que ser alimentadas por reservatórios que pudessem absorver as grandes variações das vazões, o que em muitos casos é inviável devido à imensa área de espelho d'água necessária para permitir o estabelecimento de certa energia firme.

Vale destacar também que existem situações onde a transmissão em corrente contínua não é interessante sob o ponto de vista econômico, pois para a sua construção ser viável em comparação com a alternativa de transmissão em corrente alternada, deve-se envolver grandes distâncias e potências, de forma que os altos custos envolvidos na construção das estações conversoras e inversoras somados ao menor custo do sistema de transmissão tornem a opção economicamente atrativa.

Nestes casos, se a opção pela conexão unitária apresentar ganhos energéticos que justifiquem a sua aplicação, o acoplamento dos sistemas pode ser executado em um arranjo “back to back” dentro da própria usina, conforme a Figura 4.3, mantendo a transmissão em corrente alternada e apresentando as mesmas características da conexão unitária.



**Figura 4.3 - Sistema back-to-back**

Em resumo, a seguir apresentamos as principais vantagens e desvantagens desta conexão.

### **Vantagens:**

Existem basicamente em comparação com o uso de sistemas de transmissão em corrente contínua:

- eliminação de um estágio de transformação e barramento CA - grande redução no custo de investimento e no custo operacional da usina. Permite ainda redução da área do pátio da subestação da usina.
- eliminação dos filtros CA - resulta também na redução do investimento, porém exerce influência nos parâmetros a serem definidos para o gerador, devido à maior penetração harmônica que pode aumentar as suas perdas.
- eliminação dos OLTCs dos transformadores conversores: pode-se ainda eliminar o comutador quando for possível estabelecer um controle de tensão a partir da excitação do gerador síncrono.

### **Desvantagens:**

- necessidade de fonte auxiliar: a conexão direta do conjunto gerador-conversora ao conversor elimina o acesso à fonte CA necessária para suprir os serviços locais da usina. Torna-se necessário então dispor de uma fonte alternativa para este suprimento. No caso de sistemas “back to back” este item não se aplica.
- estabelecimento de um “isolamento” entre a inércia do sistema de geração e o sistema de transmissão devido ao uso do conversor no estator.
- o conversor de potência deve ser dimensionado para capacidade total da unidade geradora.

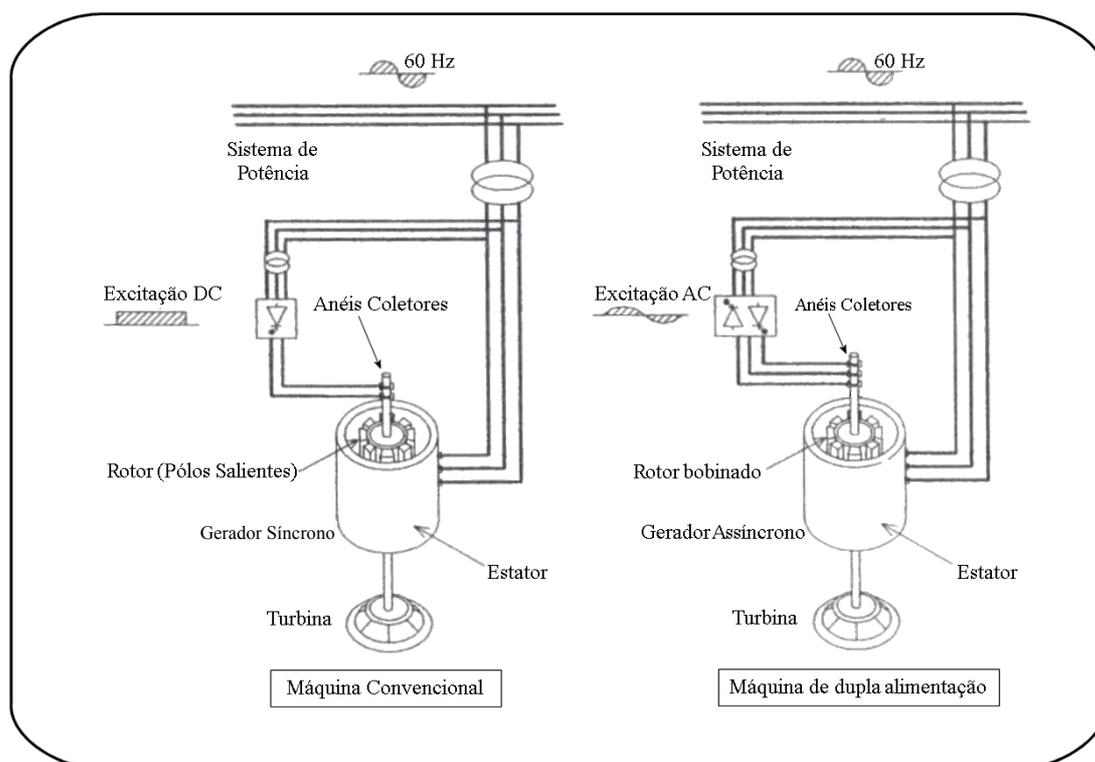
## **4.1.2 Máquinas de dupla alimentação – Conexão CA**

O princípio da conexão em CA reside na utilização de máquinas de indução com rotor bobinado ao invés de máquinas síncronas convencionais. As grandes diferenças

entre elas estão na construção do seu rotor e dos anéis coletores. Estruturalmente, o rotor sofre modificações que serão apresentadas mais adiante e, agora passa a dispor de um enrolamento bobinado trifásico. Quanto aos pares de anéis coletores da excitação em corrente contínua da máquina síncrona, estes passam a ser três ou seis anéis que serão alimentados em corrente alternada. Todos os outros componentes, apesar de pequenas modificações que também serão demonstradas mais adiante, são os mesmos utilizados nas máquinas síncronas convencionais. A Figura 4.4 a seguir apresenta as suas maiores diferenças.

Seu princípio de operação e funcionamento se baseia no sistema de conexão conhecido como Sherbius [13], no qual o estator da máquina é conectado à rede e o rotor é alimentado por um conversor CA, que possui frequência ajustável à diferença entre as rotações mecânica do rotor e síncrona do sistema.

Nesta configuração, como se utiliza o princípio de aplicação da conversão eletrônica sobre o rotor da máquina, obtém-se uma significativa redução de sua capacidade quando comparado ao sistema de conexão unitária. Neste esquema, o conversor deve ser dimensionado somente para a potência de escorregamento, que é determinada de forma compatível com a faixa de variação de velocidade. Observa-se neste ponto que as limitações impostas pela turbina também exercem influência na capacidade deste conversor, sendo que de acordo com a literatura [1] foi verificado que o seu valor gira em torno de  $\pm 15\%$ .



**Figura 4.4 Máquina Convencional x Máquina de Dupla Alimentação**

Esta aplicação, embora utilize um outro tipo de máquina elétrica rotativa, pode ser adotada em projetos de recapitação de plantas geradoras existentes, realizando-se basicamente a substituição do rotor do gerador síncrono por outro com enrolamento trifásico. Observa-se que com o objetivo de agregar ganhos ambientais e/ou energéticos, conforme mostrado anteriormente, sua aplicação é mais viável em turbinas de alta velocidade, com rotações em torno de 250 até 300 r.p.m., que implicam em máquinas com número de pólos relativamente baixo, em torno de 26 à 30.

Em contraste, para o caso de usinas com turbinas Francis instaladas em altas quedas e conseqüente baixa velocidade de rotação, com máquinas com um grande número de pólos, esta substituição seria, estruturalmente, bastante complexa em razão das dificuldades de sustentação de um rotor bobinado com um elevado número de pólos.

Conforme verificado em [13], com exceção de alguns obstáculos relativos à ocorrência de vibrações mecânicas, a recapitação da hidrelétrica de Compuerto,

localizada na Espanha, com a substituição do rotor da máquina síncrona por um rotor com enrolamento trifásico ocorreu com sucesso.

Este tipo de máquina é utilizado há muitos anos, tendo sido adotado inicialmente para o fornecimento de energia em sistemas de tração, na frequência de 16.7 Hz, a partir de sistemas alimentados na frequência de 50 Hz. Esta aplicação foi realizada na década de 70 para o sistema ferroviário de Seebach na Suíça e operava com variação de velocidade de  $\pm 5\%$ .

Para a geração de energia, a primeira fonte primária a utilizar esta tecnologia foi a energia eólica [12], visto que o seu processo de transformação primário da energia cinética em energia mecânica, segue literalmente “ao sabor dos ventos”, sendo impossível armazená-los e aproveitá-los de forma contínua com o uso de um gerador que tivesse que ser mantido em uma velocidade constante. Os primeiros aerogeradores adotavam máquinas assíncronas devido à sua robustez, construção simples (principalmente as máquinas com rotor em gaiola de esquilo) e baixo custo, porém a necessidade de aplicação de controles muito apurados para mantê-las com frequência e tensões estabilizadas, mesmo em rotação variável somada à necessidade de ajuste da geração de potência ativa e reativa, propiciou o desenvolvimento de diversas alternativas, sendo obtido o maior sucesso com o uso das máquinas de dupla alimentação.

As estações de bombeamento de água e as usinas reversíveis são outros aproveitamentos que há anos já utilizam as máquinas de dupla alimentação. Nessas aplicações, a viabilidade de sua integração é determinada pela exigência do controle contínuo de velocidade de permitir e variar a carga no modo motor/bomba.

A operação reversível não precisa ser sempre em capacidade máxima e a potência pode ser ajustada de forma que seja apenas utilizado o excedente de energia disponível no sistema durante as horas de baixo consumo ou de menor preço. Nos casos de usinas de bombeamento, a existência de grandes variações na altura de queda útil, pode provocar a operação com perdas energéticas tão grandes que as tornariam inviáveis sem a variação de velocidade. Em usinas reversíveis convencionais, este

ajuste é realizado através do chaveamento das unidades moto/geradoras, permitindo a entrada de mais ou menos máquinas, de acordo com o patamar de carga atual. No caso de bombeamentos convencionais, uma das alternativas adotadas é o uso de máquinas de pólos comutáveis que possibilitam a operação com velocidades diferentes através da comutação das ligações dos enrolamentos de armadura e de excitação, obtendo-se normalmente a variação discreta de dois valores de velocidade definidos.

Por fim, como o uso de máquinas de dupla alimentação permite o ajuste independente das potências ativa e reativa, tanto no modo motor como gerador, conforme será apresentado mais adiante, além de contribuir para a regulação de potência reativa no sistema, pode atuar na capacidade de regulação de frequência e na melhoria da estabilidade dinâmica do sistema.

O ajuste da velocidade de rotação do campo magnético do rotor, independente da rotação mecânica da turbina, permite principalmente que a máquina se “livre” da inércia imposta pelo rotor e pelo sistema hidráulico, e assim possa realizar um ajuste do seu eixo magnético muito mais rapidamente devido à velocidade do chaveamento da eletrônica de potência. Desta forma, pode-se obter ganhos até no tempo de sincronização e retomada de carga da usina.

Em resumo, as principais vantagens e desvantagens da conexão CA através de máquinas de dupla alimentação.

**Vantagens:**

- É uma alternativa a ser avaliada com base no mesmo sistema de transmissão CA, comparando-o com os geradores síncronos convencionais.
- Menor capacidade do conversor de potência: em comparação ao controle de velocidade por ação no estator, este deve ser projetado para conduzir somente a parcela de escorregamento. Seu dimensionamento é função direta da faixa de variação de velocidade.
- Controle contínuo de velocidade: ao contrário das máquinas com polaridade comutável, onde há somente um controle discreto da velocidade, este esquema

permite um maior aproveitamento energético dos recursos hídricos (gerador) ou dos recursos elétricos (motor).

- Controle independente de potência ativa e reativa: demonstra-se que a partir de uma determinada estratégia de controle, pode-se ajustar de forma praticamente independente as potências ativa e reativa.
- Possibilidade de regulação de frequência e melhor desempenho dinâmico.

#### **Desvantagens:**

- Custo do gerador: apesar de se verificar que para cada aproveitamento hidrelétrico, os seus projetos e construções são realizados sob encomenda, ou seja, como se fossem únicos em razão das muitas particularidades existentes em cada novo empreendimento, a tecnologia de geração síncrona está bastante absorvida e as suas técnicas, soluções e plataformas de desenvolvimento estão bastante difundidas. Por outro lado, devido à construção de geradores de indução de dupla alimentação ainda não possuir técnicas de construção tão disseminadas, aliada à sua maior complexidade em comparação com uma máquina síncrona, o seu custo de aquisição, manutenção e de peças de reposição é mais elevado.

Finalmente, após esta análise fundamentada em uma avaliação comparativa, conclui-se que a solução tecnológica que agrega maiores benefícios e possui flexibilidade para concorrer tanto no que se diz respeito à sua aplicação em novos empreendimentos, quanto para ser nomeada como opção viável para estudos de recapitação de aproveitamentos existentes, é a conexão em corrente alternada com o uso de máquinas de dupla alimentação.

Seus benefícios vão além do plano inicial de desvincular a velocidade de rotação mecânica da frequência elétrica do sistema com os objetivos primitivos de aumento do rendimento do processo de conversão de energia, redução das interferências exercidas pelo reservatório no meio ambiente e aumento da flexibilidade operacional. Nesta perspectiva, passa-se a ter ganhos para a próprio sistema elétrico de potência que irá se beneficiar em conjunto com essas outras áreas, fazendo com que esta tecnologia se

apresente de forma muito atraente para os diversos setores envolvidos na geração de energia hidrelétrica.

A Tabela 4.1 a seguir apresenta as usinas hidráulicas com rotação ajustável em operação ou em planejamento

**Tabela 4.1 - Usinas com Rotação Ajustável em Serviço ou em Construção**

Companhia Concessionária	Central Hidrelétrica	Número de Unidades	Data de Entrada em Serviço	Capacidade de Geração (MVA)	Fabricante	Faixa de Variação de Velocidade (r.p.m)
TEPCO	YAGISAWA	2	1990	85	Toshiba	130 – 156
HOKKAIDO	TAKAMI	2	1993	140	Mitsubishi	208 – 254
KANSAI	OHKAWACHI	2	1993	395	Hitachi	330 – 390
TEPCO	SHIOBARA	3	1995	360	Toshiba	356 – 394
KANSAI	OHKAWACHI	4	1995	395	Hitachi	330 – 390
TEPCO	YAGISAWA	3	1996	85	Toshiba	130 – 156
EPDC	OKUKIYOTSU	2	1996	345	Toshiba	408 – 450
TEPCO	KAZUNOGAWA	1	2005	500	ND	500 (síncrona)
KYUSHU	OMARUGAWA	3	2005	340	Mitsubishi	576 – 624

## 4.2 A máquina de indução de dupla alimentação

Objeto de maior ênfase neste estudo, a máquina de indução, será agora apresentada abordando desde seus aspectos construtivos até os equipamentos auxiliares necessários para o seu funcionamento.

### 4.2.1 Aspectos construtivos

O desenho estrutural de uma máquina assíncrona de rotor bobinado comparada com uma máquina síncrona de pólos salientes apresenta diferenças somente no lado do rotor.

Todos os componentes estáticos como a carcaça, o estator e seus enrolamentos, os mancais e demais suportes seguem o mesmo conceito de projeto de uma máquina síncrona.

O rotor por sua vez, necessita de projeto especial, visto que agora está equipado com um enrolamento trifásico alimentado por um ou dois anéis coletores por fase, através de um sistema de corrente alternada com frequência igual à frequência de escorregamento. Esta nova condição exige que seu projeto atente para outras premissas.

Para esta máquina, as perdas no ferro devem ser minimizadas considerando a alimentação na frequência de escorregamento e não podem promover aquecimento acima do limite térmico ou não suportar o stress mecânico.

Desta forma, algumas soluções apresentadas em [13] são as seguintes:

### **Estrutura do Rotor**

Uma vez que o rotor está submetido a um fluxo magnético variável no tempo, é necessário que sua construção seja feita com chapas de aço-silício, isoladas entre si e empilhadas de forma contínua com sobreposição entre as diversas camadas para aumentar a rigidez mecânica e reduzir as perdas no ferro

### **Solicitações Mecânicas**

De forma análoga às máquinas de pólos salientes, é preciso que tanto o corpo do rotor quanto o enrolamento rotórico sejam dimensionados para suportar os esforços mecânicos durante um eventual disparo. Embora se possa limitar a rotação máxima curto-circuitando o enrolamento do estator para frear a máquina através do conversor, é necessário que todos os componentes rotativos e, principalmente, as bandagens que suportam as cabeças de bobina do enrolamento rotórico sejam dimensionadas para o caso extremo de disparo.

### **Enrolamento do Rotor**

Considerando o fato de que, em qualquer rotação, com exceção da síncrona, o enrolamento do rotor será percorrido por correntes alternadas e sujeito a harmônicos, é recomendável que se utilize barras transpostas e enrolamentos ondulados no circuito rotórico, evitando correntes de circulação, reduzindo perdas e aquecimento. Também os materiais isolantes utilizados na isolação principal (contra a terra), nas cunhas de

fechamento das ranhuras e nas bandagens, devem possuir elevada resistência mecânica, além de elevada rigidez dielétrica.

### **Reforços Mecânicos do Enrolamento do Rotor**

De uma forma análoga ao que ocorre nas máquinas síncronas, o enrolamento rotórico da máquina de dupla alimentação deve ser capaz de suportar esforços mecânicos relativamente elevados. No entanto, considerando-se que neste tipo de máquina, em rotação diferente da síncrona, a corrente que circula no enrolamento do rotor é alternada e contém harmônicos, não se deve utilizar suportes e fixações metálicos, mesmo que não magnéticos, na região das cabeças de bobina, de forma a evitar circulação de correntes induzidas por fluxo de dispersão. Da mesma forma, deve-se evitar o uso de cunhas metálicas para o fechamento das ranhuras rotóricas. Para prevenir a circulação de correntes na parte laminada do rotor é recomendável o uso de cunhas de material isolante, polimerizado/impregnado, de elevada rigidez mecânica .

### **Ventilação e Refrigeração**

Dado que a faixa usual de variação da rotação na máquina de dupla alimentação alimentada por conversor no circuito rotórico é de  $\pm 15\%$ , permite-se que seja dispensado o uso de moto-ventiladores para a sua refrigeração.

### **Anéis Coletores**

Pelo fato das correntes rotóricas serem de baixa frequência e de valores elevados, são utilizados 2 anéis coletores por fase, dando um total de 6 anéis. No coletor são utilizados ventiladores, cujas funções são refrigerar as escovas e retirar as partículas de sujeira.

## **4.2.2 Equipamentos auxiliares**

### **Proteção Crow-Bar**

A proteção tipo crow-bar é específica para máquinas de dupla alimentação e tem como finalidade principal a proteção dos conversores contra sobre correntes. Quando o

seu valor de ativação é ultrapassado, o conversor é bloqueado e by-passado por uma impedância. Verificou-se na literatura [9,21] que o crow-bar é usualmente ativado pelos parâmetros: tensão máxima no capacitor, tensão mínima na barra terminal, corrente máxima no estator e corrente máxima no rotor.

## **O Conversor Estático**

Para que a máquina de dupla alimentação possa operar como motor ou gerador, em rotação ajustável, tanto em velocidades sub-síncronas, quanto em velocidades sobre-síncronas ou até mesmo na velocidade síncrona, é necessário que o conversor tenha capacidade de operar nos quatro quadrantes, isto é, ele deve ter a capacidade de fazer fluir por ele a potência de escorregamento nos dois sentidos.

Os conversores inicialmente utilizados para esta alimentação alternada com frequência ajustável foram os cicloconversores, surgidos no final da década de 70 e caracterizados pela topologia de conversão direta e sem malhas intermediárias. Sua configuração se caracteriza por um conversor composto por duas pontes trifásicas antiparalelas de seis pulsos para cada fase, equipada com tiristores, cada qual conectado a rede através de um transformador. Dependendo das características dos tiristores e da necessidade de redução de harmônicos, pode-se aumentar o número de pulsos de disparo e recorrer ao processo de associação série no lado CA, através da conexão de transformadores com defasamento e relação de espiras adequadas, de forma a obter o cancelamento dos harmônicos de baixa ordem.

Porém, com o surgimento dos dispositivos semicondutores com capacidade de controle de disparo e corte, como o GTO (Gate Turn-off Thyristor) e o IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), passou-se a utilizar a tecnologia FACTS VSI, ou seja, sistemas flexíveis de transmissão de corrente alternada (FACTS) baseados em inversores de tensão (VSI).

Em comparação aos cicloconversores que necessitavam geralmente de 3 transformadores de 3 enrolamentos e de 72 semicondutores, o conversor VSI de 3 níveis precisa somente de 1 transformador e de 12 GTOs para cada lado (esquema back-to-

back), além de capacitores para o elo CC. Neste conversor utiliza-se uma malha intermediária, e que com auxílio de capacitores obtém-se uma fonte de tensão CC.

Embora seja possível associar também vários conversores VSI como forma de redução dos harmônicos, a configuração que está sendo utilizado nas ultimas aplicações e indicada na literatura utiliza um único VSI trifásico de 3 níveis de tensão, por representar melhor solução de compromisso entre flexibilidade, complexidade do controle de corte e disparo e nível de harmônicos [22,28].

Verifica-se também, que apesar de ser possível a utilização de vários tipos de modulação nos disparo das válvulas, o método mais utilizado é por largura de pulso (PWM) senoidal.

### **4.2.3 Modos de operação**

Com o emprego do conversor estático, pode-se alimentar o rotor da máquina de dupla alimentação com corrente alternada, de forma que a mesma se comporte como uma máquina síncrona convencional excitada com corrente contínua. Evidentemente, essa alimentação deve ter a sua frequência ajustada de tal maneira a compensar a variação da velocidade de rotação do rotor, impondo que a soma da frequência elétrica de sua corrente de excitação com a frequência mecânica da rotação do eixo do rotor seja constante e no valor da frequência síncrona de rotação do campo do estator.

Para operação em velocidades sub-síncronas, a frequência de excitação terá valores iguais a frequência de escorregamento, sendo positiva em relação à frequência síncrona do estator, isto é, o campo produzido por ela deve girar no mesmo sentido do campo girante do estator, fazendo com que, ao se somarem, estejam em sincronismo com o campo do estator.

Por outro lado, na operação em velocidades sobre-síncronas, a frequência de excitação terá valores iguais a frequência de escorregamento, sendo reversa em relação à frequência síncrona do estator, isto é, o campo produzido por ela deve girar no sentido

contrário ao do campo girante do estator, descontando o seu avanço e colocando-o também em sincronismo com campo do estator.

Quanto ao sentido do fluxo de potência no rotor, tem-se para a operação motora em velocidades sub-síncronas e geradora em velocidades sobre-síncronas, a saída de potência ativa através do mesmo, visto que comparando com a operação de uma máquina de indução convencional, estas seriam formas de operação próximas a sua operação “natural”. Em contrapartida, para a operação motora em velocidades sobre-síncronas e geradora em velocidades sub-síncronas, tem-se a necessidade de injetar potência ativa no rotor da máquina.

Em resumo, desprezando-se as perdas de potência na máquina e no conversor, tem-se os seguintes modos de operação para a máquina de dupla alimentação. Adota-se a convenção de motor para a operação motor e gerador para operação gerador.

### **Motor em velocidade sub-síncrona**

Nesta condição a velocidade está abaixo da velocidade síncrona e o escorregamento é positivo. A potência de escorregamento é fornecida pelos enrolamentos do rotor e é recuperada nos terminais do estator através da ação do conversor. A corrente do rotor é ajustada pelo conversor para a frequência de escorregamento girante no mesmo sentido da frequência do campo girante do estator. Neste caso a potência consumida da rede ( $P_e$ ) tem valor inferior ao da potência consumida no estator ( $P_s$ ), visto que o estator consome também a potência de escorregamento recuperada e fornecida pelo rotor ( $-P_r$ ) (por isso o sinal negativo). Neste ponto de operação tem-se um funcionamento próximo ao “natural” de uma máquina de indução.

### **Motor em velocidade sobre-síncrona**

Nesta condição a velocidade está acima da síncrona, e o escorregamento é negativo. Neste caso a potência de escorregamento é consumida pelos enrolamentos do rotor. A corrente do rotor é ajustada pelo conversor para a frequência de

escorregamento no sentido contrário da frequência do campo girante do estator. Neste caso a potência consumida da rede ( $P_e$ ) tem valor superior ao da potência consumida no estator ( $P_s$ ), visto que a sua potência e a potência do rotor ( $P_r$ ) são consumidas pela máquina.

Em ambas as condições, o sistema elétrico fornece potência elétrica à máquina que a converte em potência mecânica no eixo. Para melhor compreensão, estes modos de operação estão apresentados na Figura 4.5.

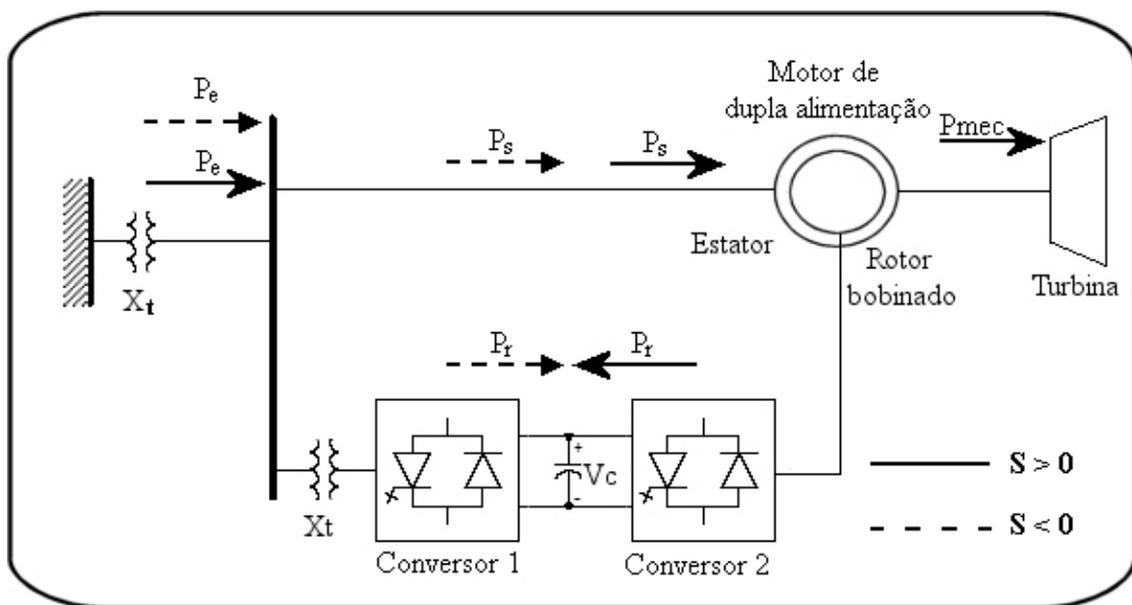


Figura 4.5 - Fluxo de Potência no Modo Motor

### Gerador em velocidade sub-síncrona

Nesta condição a velocidade está abaixo da velocidade síncrona e o escorregamento é positivo. Para que a tensão gerada possua a mesma frequência da rede, é necessário que a potência de escorregamento seja consumida pelos enrolamentos do rotor. A corrente do rotor é ajustada pelo conversor para a frequência de escorregamento girante no mesmo sentido da frequência do campo girante do estator. Neste caso a potência fornecida para a rede ( $P_g$ ) tem valor inferior ao da potência fornecida pelo estator ( $P_s$ ), visto que os terminais do estator fornecem a potência de escorregamento consumida pelo rotor ( $-P_r$ ) (por isso o sinal negativo).

## Gerador em velocidade sobre-síncrona

Nesta condição a velocidade está acima da síncrona, e o escorregamento é negativo. A potência de escorregamento é fornecida pelos enrolamentos do rotor e, é recuperada e entregue à rede nos terminais do estator através da ação do conversor. A corrente do rotor é ajustada pelo conversor para a frequência de escorregamento no sentido contrário da frequência do campo girante do estator. Neste caso a potência fornecida para a rede ( $P_g$ ) tem valor superior ao da potência fornecida pelo estator ( $P_s$ ), visto que o rotor também fornece potência a rede ( $P_r$ ). Neste ponto de operação tem-se um funcionamento próximo ao “natural” de uma máquina de indução.

Em ambas as condições, a turbina fornece potência mecânica à máquina que a converte em potência elétrica. Para melhor compreensão, estes modos de operação estão apresentados na Figura 4.6.

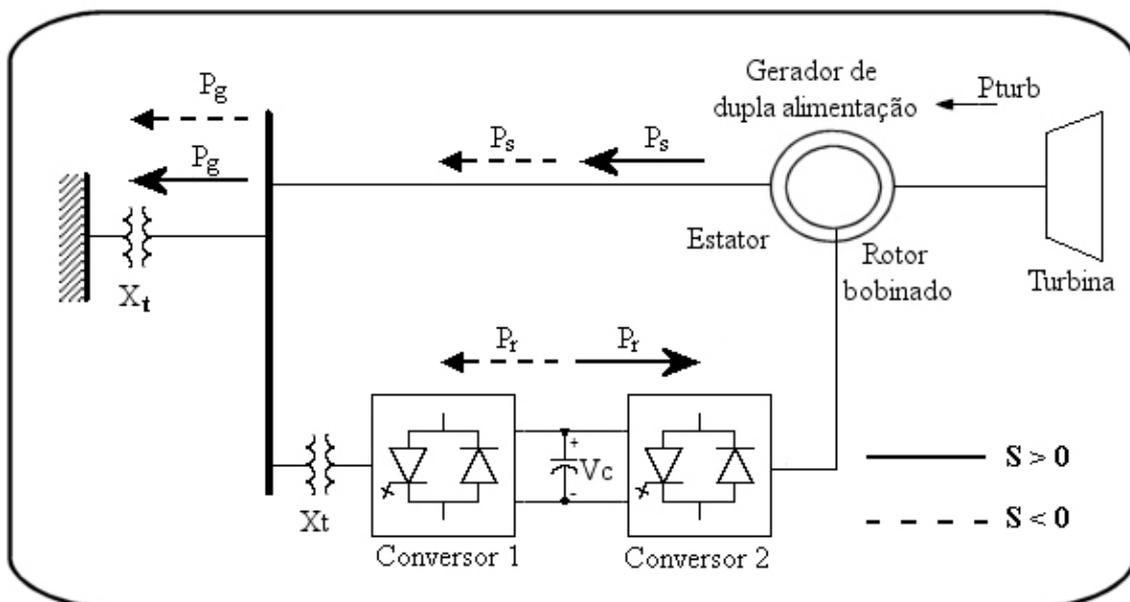


Figura 4.6 - Fluxo de Potência no Modo Gerador

# Capítulo 5

## Modelagem e Simulação

Neste capítulo será demonstrada a modelagem matemática da máquina de indução de dupla alimentação através da dedução das equações principais que descrevem o seu comportamento, considerando o seu princípio de funcionamento em velocidade ajustável. Este desenvolvimento utilizará a teoria da transformação “dq” [3,15], universalmente adotada e apresentará também o seu modelo orientado pelo campo do estator. Por fim, será apresentada uma simulação com o desempenho dinâmico da máquina operando em condição de gerador e motor.

### 5.1 Modelo matemático da máquina de indução de dupla alimentação

O modelo será inicialmente desenvolvido baseando-se nas variáveis de fase do estator e do rotor e do seu ângulo de alinhamento. Porém, devido à complexidade de sua resolução uma vez que seus parâmetros estariam variando com a posição do rotor, este será convenientemente transformado para um outro conjunto de variáveis, através da transformação dq, conhecida como Transformação de Park [3,14,15].

Será adotada a convenção de carga, isto é, convenção de motor para o estator e rotor, sendo os enrolamentos da três fases do estator designados por A, B e C e os três enrolamentos do rotor por a, b e c.

Visando facilitar esta modelagem matemática, algumas hipóteses simplificadoras serão admitidas de forma a não torná-la extremamente complexa:

- Os 3 enrolamentos estatóricos e rotóricos são iguais entre si.
- O circuito magnético é considerado linear, isto é, despreza-se a saturação magnética e a histerese.

- Considera-se somente a componente fundamental da FMM produzida pelos enrolamentos.

A Figura 5.1 a seguir representa esquematicamente os eixos magnéticos dos enrolamentos das fases do estator e do rotor.

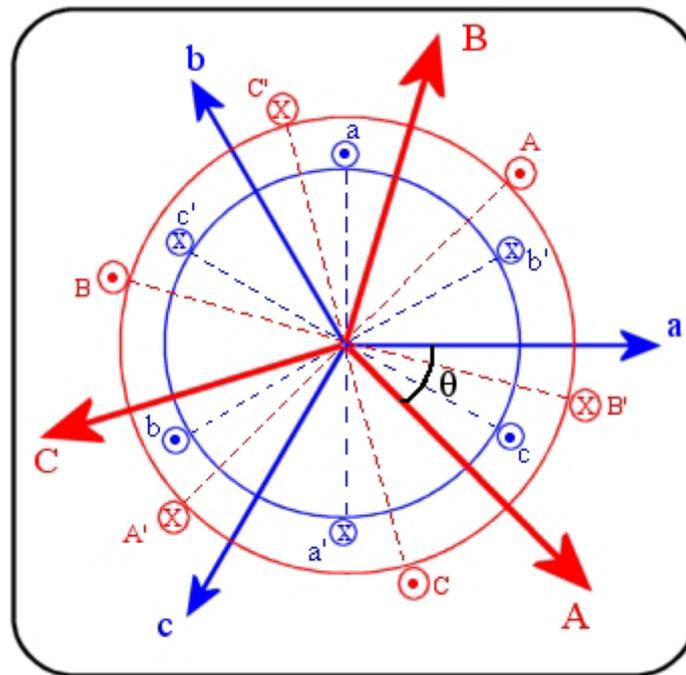


Figura 5.1 - Eixos Magnéticos do Rotor e Estator

### 1- Determinação das resistências

Considerando-se enrolamentos iguais para estator e iguais para o rotor:

$$R_A = R_B = R_C = R_s \quad \text{e} \quad R_a = R_b = R_c = R_r$$

Na forma matricial temos:

$$R_{SS} = \begin{bmatrix} R_s & & \\ & R_s & \\ & & R_s \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad R_{RR} = \begin{bmatrix} R_r & & \\ & R_r & \\ & & R_r \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

Sendo  $R_{SS}$  a matriz resistência do estator e  $R_{RR}$  a matriz resistência do rotor.

Para a máquina completa tem-se:

$$R = \begin{bmatrix} R_{SS} & & \\ & & \\ & & R_{RR} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (5.1)$$

Sendo  $R$  a matriz completa de resistência da máquina.

## 2- Determinação das indutâncias

### Definição das indutâncias Próprias

Como esta máquina possui entreferro constante, os valores das indutâncias próprias dos enrolamentos do estator e do rotor não dependem da posição do rotor, ou seja, são valores constantes e iguais para as três fases do estator e as três fases do rotor.

### Definição das indutâncias mútuas - Enrolamentos estator-estator e rotor-rotor

Como a posição relativa entre eles não varia e independe da posição do rotor, também serão valores constantes e iguais para os enrolamentos defasados de 120° graus, dois a dois. Como este ângulo é maior que 90°, a indutância terá um valor absoluto negativo.

Na forma matricial, temos para o estator e rotor:

$$\mathcal{L}_S = \begin{bmatrix} \mathcal{L}_{SS} & \mathcal{M}_{SS} & \mathcal{M}_{SS} \\ \mathcal{M}_{SS} & \mathcal{L}_{SS} & \mathcal{M}_{SS} \\ \mathcal{M}_{SS} & \mathcal{M}_{SS} & \mathcal{L}_{SS} \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad \mathcal{L}_R = \begin{bmatrix} \mathcal{L}_{RR} & \mathcal{M}_{RR} & \mathcal{M}_{RR} \\ \mathcal{M}_{RR} & \mathcal{L}_{RR} & \mathcal{M}_{RR} \\ \mathcal{M}_{RR} & \mathcal{M}_{RR} & \mathcal{L}_{RR} \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

Sendo  $\mathcal{L}_S$  a matriz indutância do estator e  $\mathcal{L}_R$  a matriz indutância do rotor. Estas são composta pelos seguintes elementos:  $\mathcal{L}_{SS}$  referente as indutâncias próprias do estator,  $\mathcal{L}_{RR}$  referente as indutâncias próprias do rotor,  $\mathcal{M}_{SS}$  referente as indutâncias mútuas do estator-estator e  $\mathcal{M}_{RR}$  referente as indutâncias mútuas do rotor-rotor.

### Definição das indutâncias mútuas - Enrolamentos do rotor e estator

Analisando a Figura 5.1, pode-se constatar que a indutância mútua entre os enrolamentos do estator e do rotor varia com a rotação do rotor, sendo função do ângulo  $\theta = \omega_r t + \theta_0$  de alinhamento entre eles, sendo  $\theta_0$  a sua posição inicial e  $\omega_r$  a velocidade angular do rotor. Esta constatação, por si, já demonstra que esta máquina funciona sob atuação de torque de excitação, visto que na determinação das indutâncias próprias não foi identificada a sua variação com a posição do rotor.

Na posição instantânea da figura, tem-se para a fase A do estator:

$$\begin{aligned}\mathcal{M}_{Aa} &= \mathcal{M}_{aA} = \mathcal{M}_{SR} \cos(\theta) \\ \mathcal{M}_{Ab} &= \mathcal{M}_{bA} = \mathcal{M}_{SR} \left( \cos \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \mathcal{M}_{Ac} &= \mathcal{M}_{cA} = \mathcal{M}_{SR} \left( \cos \theta - \frac{2\pi}{3} \right)\end{aligned}$$

Simetricamente, aplicando para as outras fases, tem-se na forma matricial:

$$\mathcal{L}_{SR} = \mathcal{L}_{RS}^T = \mathcal{M}_{SR} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 120) & \cos(\theta - 120) \\ \cos(\theta - 120) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 120) \\ \cos(\theta + 120) & \cos(\theta - 120) & \cos(\theta) \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

Sendo  $\mathcal{L}_{SR}$  a matriz indutâncias mútuas do estator-rotor composta pelos elementos  $\mathcal{M}_{SR}$  referentes a estas indutâncias mútuas.

Para a máquina completa tem-se:

$$\mathcal{L} = \begin{bmatrix} \mathcal{L}_S & \mathcal{L}_{SR} \\ \mathcal{L}_{RS} & \mathcal{L}_R \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (5.2)$$

### 3 - Equações de enlace de fluxo e tensão nos enrolamentos da máquina

Pode-se agora representar a máquina através de equações relacionando as tensões aplicadas nos enrolamentos com as quedas de tensão e as variações de enlace de fluxo.

Para o enlace de fluxo:

$$\lambda^{abc/SR} = \mathcal{L} \cdot i^{abc/SR}$$

$$\text{onde } \lambda^{abc/SR} = [\lambda_A \ \lambda_B \ \lambda_C \ \lambda_a \ \lambda_b \ \lambda_c]^T \text{ e } i^{abc/SR} = [i_A \ i_B \ i_C \ i_a \ i_b \ i_c]^T$$

Logo, na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \lambda_A \\ \lambda_B \\ \lambda_C \\ \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{L}_S & \mathcal{L}_{SR} \\ \mathcal{L}_{RS} & \mathcal{L}_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5.3)$$



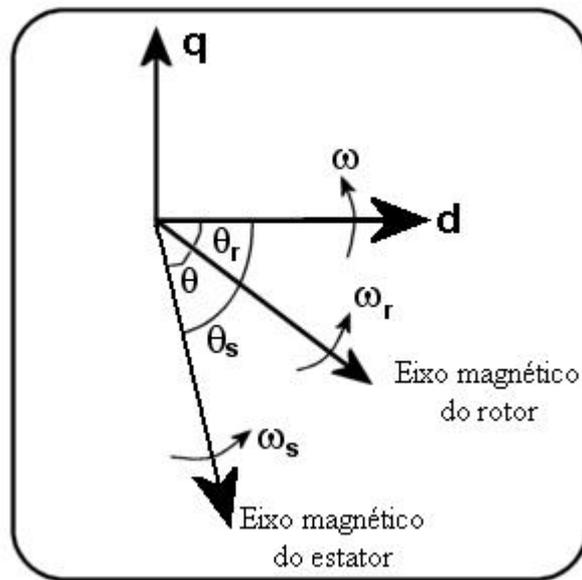


Figura 5.2 - Eixos dq da Transformação de Park

Nesta modelagem, o eixo d faz um ângulo de  $\theta_s$  com o eixo magnético da fase A do estator e ângulo de  $\theta_r$  com o eixo magnético da fase a do rotor. Adota-se a Transformada de Park variante em potência

Transformada de Park para estator

$$T_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - 120) & \cos(\theta_s + 120) \\ -\text{sen}(\theta_s) & -\text{sen}(\theta_s - 120) & -\text{sen}(\theta_s + 120) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

Transformada de Park para rotor

$$T_r = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - 120) & \cos(\theta_r + 120) \\ -\text{sen}(\theta_r) & -\text{sen}(\theta_r - 120) & -\text{sen}(\theta_r + 120) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

Transformada de Park inversa para estator

$$T_s^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\text{sen}(\theta_s) & 1 \\ \cos(\theta_s - 120) & -\text{sen}(\theta_s - 120) & 1 \\ \cos(\theta_s + 120) & -\text{sen}(\theta_s + 120) & 1 \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

Transformada de Park inversa para rotor

$$T_r^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\text{sen}(\theta_r) & 1 \\ \cos(\theta_r - 120) & -\text{sen}(\theta_r - 120) & 1 \\ \cos(\theta_r + 120) & -\text{sen}(\theta_r + 120) & 1 \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

Considerando uma mudança de variáveis definida por  $T$  e  $T^{-1}$ , onde:

$$T = \begin{bmatrix} T_s & \\ & T_r \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (5.5)$$

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} T_s^{-1} & \\ & T_r^{-1} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (5.6)$$

Considerando as seguintes mudanças de variáveis

$$i^{abc/SR} = T^{-1} i^{dqo/SR}$$

$$\lambda^{abc/SR} = T^{-1} \lambda^{dqo/SR}$$

$$v^{dqo/SR} = T v^{abc/SR}$$

Aplicando, pré-multiplicado a equação(5.3) por T e substituindo  $i^{abc/SR}$  por  $T^{-1}i^{dqo/SR}$ , tem se:

$$T \left[ \lambda^{abc/SR} \right] = T \mathcal{L} \left[ i^{abc/SR} \right]$$

$$\left[ \lambda^{dqo/SR} \right] = T \mathcal{L} T^{-1} \left[ i^{dqo/SR} \right]$$

efetuando-se a multiplicação da matriz, temos:

$$T \cdot \mathcal{L} \cdot T^{-1} = L$$

$$L = \begin{bmatrix} \mathcal{L}_S - \mathcal{M}_{SS} & & & \frac{3}{2} \mathcal{M}_{RS} & & \\ & \mathcal{L}_S - \mathcal{M}_{SS} & & & \frac{3}{2} \mathcal{M}_{RS} & \\ & & \mathcal{L}_S + 2\mathcal{M}_{SS} & & & \\ \frac{3}{2} \mathcal{M}_{RS} & & & \mathcal{L}_R - \mathcal{M}_{RR} & & \\ & \frac{3}{2} \mathcal{M}_{RS} & & & \mathcal{L}_R - \mathcal{M}_{RR} & \\ & & & & & \mathcal{L}_R - 2\mathcal{M}_{RR} \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

Definindo

$$\begin{aligned} L_s &= \mathcal{L}_S - \mathcal{M}_{SS} & L_{\phi_s} &= \mathcal{L}_S + 2\mathcal{M}_{SS} & M_{rs} &= \frac{3}{2} \mathcal{M}_{RS} \\ L_r &= \mathcal{L}_R - \mathcal{M}_{RR} & L_{\phi_r} &= \mathcal{L}_R + 2\mathcal{M}_{RR} & & \end{aligned}$$

Dessa forma, as equações de enlace de fluxo do motor de dupla alimentação, nas variáveis de Park são:

Estató:

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + M_{rs} i_{dr} \quad (5.7)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + M_{rs} i_{qr} \quad (5.8)$$

$$\lambda_{\phi_s} = L_{\phi_s} i_{\phi_s} \quad (5.9)$$

Rotor:

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + M_{rs} i_{ds} \quad (5.10)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + M_{rs} i_{qs} \quad (5.11)$$

$$\lambda_{\phi r} = L_{\phi r} i_{\phi r} \quad (5.12)$$

Aplicando, pré-multiplicando a equação (5.4) por  $T$  e substituindo  $i^{abc/SR}$  por  $i^{dqo/SR}$  e  $\lambda^{abc/SR}$  por  $\lambda^{dqo/SR}$ , tem-se

$$T \left[ v^{abc/SR} \right] = TR \left[ i^{abc/SR} \right] + T \frac{d}{dt} \left[ \lambda^{abc/SR} \right]$$

$$\left[ v^{dqo/SR} \right] = TRT^{-1} \left[ i^{dqo/SR} \right] + T \frac{d}{dt} \left[ T^{-1} \lambda^{dqo/SR} \right]$$

$$\left[ v^{dqo/SR} \right] = TRT^{-1} \left[ i^{dqo/SR} \right] + T \frac{d}{dt} T^{-1} \left[ \lambda^{dqo/SR} \right] + TT^{-1} \frac{d}{dt} \left[ \lambda^{dqo/SR} \right]$$

$$\left[ v^{dqo/SR} \right] = TRT^{-1} \left[ i^{dqo/SR} \right] + T \frac{d}{dt} T^{-1} \left[ \lambda^{dqo/SR} \right] + \frac{d}{dt} \left[ \lambda^{dqo/SR} \right]$$

Efetando-se as multiplicações de matrizes, tem-se:

$$TRT^{-1} = R$$

$$T \left( \frac{d}{dt} T^{-1} \right) = \left[ \begin{array}{ccc|ccc} \cdot & -\dot{\theta}_s & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \dot{\theta}_s & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \hline \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & -\dot{\theta}_r & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dot{\theta}_r & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{array} \right]_{6 \times 6}$$

Dessa forma, as equações VA do motor de dupla alimentação nas variáveis de Park são:

Estatôr:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} - \dot{\theta}_s \lambda_{qs} \quad (5.13)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} + \dot{\theta}_s \lambda_{ds} \quad (5.14)$$

$$v_{\phi s} = R_s i_{\phi s} + \frac{d}{dt} \lambda_{\phi s} \quad (5.15)$$

Rotor:

$$v_{dr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \lambda_{dr} - \dot{\theta}_r \lambda_{qs} \quad (5.16)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \lambda_{qr} + \dot{\theta}_r \lambda_{ds} \quad (5.17)$$

$$v_{\phi r} = R_r i_{\phi r} + \frac{d}{dt} \lambda_{\phi r} \quad (5.18)$$

## 5 - Cálculo da Potência Ativa e Reativa para o estator e rotor

$$S = P + jQ = \hat{V}\hat{I}^*$$

Adotando-se a notação fasorial:

$$\hat{V} = V_R + jV_{im}$$

$$\hat{I}^* = I_R - jI_{im}$$

logo,

$$S = P + jQ$$

$$S = (V_R + jV_{im})(I_R - jI_{im})$$

$$S = (V_R I_R + V_{im} I_{im}) + j(V_{im} I_r - V_r I_{im})$$

$$\text{Então: } P^{abc} = [v^{abc}]^T [i^{abc}]$$

Para o estator:

$$P^{abc/s} = (T_s^{-1} v^{dqo})^T (T_s^{-1} i^{dqo})$$

$$P^{abc/s} = [v^{dqo}]^T [T_s^{-1}]^T [T_s^{-1}] [i^{dqo}]$$

efetuando-se a multiplicação, tem-se:

$$[T_s^{-1}]^T [T_s^{-1}] = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & & \\ & \frac{3}{2} & \\ & & 3 \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

$$P^{abc/s} = \frac{3}{2} (v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr}) + 3v_{\phi} i_{\phi}$$

Para sistemas equilibrados

$$P^{abc/s} = \frac{3}{2} (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) \quad (5.19)$$

Para potência reativa, analogamente

$$Q^{abc/s} = \frac{3}{2} (v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) \quad (5.20)$$

Para o rotor:

$$P^{abc/r} = \frac{3}{2} (v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr}) \quad (5.21)$$

$$Q^{abc/r} = \frac{3}{2} (v_{qr} i_{dr} - v_{dr} i_{qr}) \quad (5.22)$$

## 6 - Cálculo do Torque elétrico

$$T_{ele} \omega_{mec} = \frac{3}{2} \left[ \omega (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) + (\omega - \omega_r) (\lambda_{dr} i_{qr} - \lambda_{qr} i_{dr}) \right]$$

$$\text{onde } \omega_{mec} = \frac{\omega_r}{P}$$

Das equações de enlace de fluxo, tem-se:

$$\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds} = M_{rs} (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds})$$

$$\lambda_{dr} i_{qr} - \lambda_{qr} i_{dr} = M_{rs} (i_{ds} i_{qr} - i_{qs} i_{dr}) = -(\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds})$$

logo:

$$T_{ele} = \frac{3}{2} \frac{\omega_r}{\omega_{mec}} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}), \text{ ou}$$

$$T_{ele} = \frac{3}{2} \frac{\omega_r}{\omega_{mec}} (\lambda_{qr} i_{dr} - \lambda_{dr} i_{qr}) \quad (5.23)$$

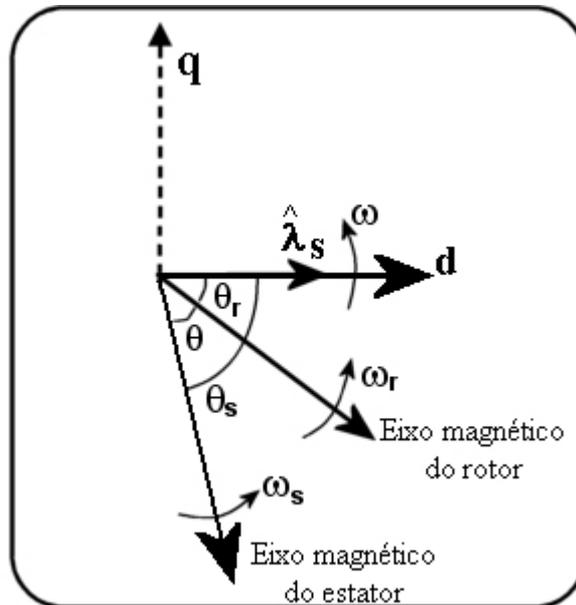
Com isso, conclui-se o modelo completo nas variáveis de Park que representam o comportamento da máquina de dupla alimentação. Pode-se observar que as equações que determinam as potências ativas e reativas, bem como a equação do torque elétrico da máquina, são determinadas como funções das correntes nos eixos d e q.

Para simplificá-las e introduzir a técnica de controle vetorial, este modelo será particularizado de modo a apresentar a possibilidade do controle orientado pelo campo do estator.

## 5.2 Modelo nas variáveis de eixo orientado pelo fluxo do estator

Com o objetivo de permitir o tratamento desacoplado das potências ativa e reativa entregues ao sistema pela máquina de dupla alimentação, o modelo matemático anteriormente desenvolvido será individualizado para um sistema de eixos girantes

coincidentes com o eixo de enlace de fluxo do estator, de acordo com os eixos apresentados na Figura 5.3.



**Figura 5.3 - Eixos dq para Modelo Orientado pelo Fluxo do Estator**

No sistema de coordenadas de Park (d,q), o enlace de fluxo do estator:

$$\lambda_{ds} = L_r i_{dr} + M_{rs} i_{dr}$$

$$\lambda_{qs} = L_r i_{qr} + M_{rs} i_{qr}$$

Na forma fasorial tem-se:

$$\lambda_s = \lambda_{dr} + j\lambda_{qr} \quad (5.24)$$

Este fasor tem uma posição instantânea bem definida no plano de acordo com a figura.

Define-se agora um novo sistema de coordenadas, ou eixo de referência, solidário ao enlace instantâneo do fluxo no estator denominado de eixo orientado segundo enlace de fluxo no estator.

Sendo este eixo orientado solidário a  $\hat{\lambda}_s$ , o mesmo se move com a mesma velocidade de  $\hat{\lambda}_s$ , identificada por  $\omega$ .

O modelo matemático será obtido a partir das equações anteriormente definidas, referentes a um sistema de eixos girantes a uma velocidade  $\omega_s$ .

Observa-se que a componente de  $\hat{\lambda}_s$  sobre o seu eixo ortogonal é nulo, portanto  $\lambda_{qs} = 0$ .

Referindo-se as equações (5.7) à (5.12) e (5.13) à (5.18), realizando as alterações necessárias e considerando um sistema equilibrado, tem-se:

Enlaces de fluxo:

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + M_{rs} i_{dr} \quad (5.25)$$

$$0 = L_s i_{qs} + M_{rs} i_{qr} \quad (5.26)$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + M_{rs} i_{dr} \quad (5.27)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + M_{rs} i_{qr} \quad (5.28)$$

Tensões:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} \quad (5.29)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \lambda_{ds} \quad (5.30)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \lambda_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (5.31)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \lambda_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (5.32)$$

Calculando as correntes do estator referidas ao novo sistema de eixos:

$$i_{ds} = \frac{1}{L_s} \lambda_{ds} - M_{rs} i_{dr} \quad (5.33)$$

$$i_{qs} = -\frac{M_{rs}}{L_s} i_{qr} \quad (5.34)$$

Para o torque elétrico, de acordo com a equação (5.23) tem-se

$$T_{ele} = \frac{3}{2} \frac{\omega_r}{\omega_{mec}} (\lambda_{ds} i_{qs})$$

$$T_{ele} = \frac{3}{2} \frac{\omega_r}{\omega_{mec}} \left( -\frac{M_{rs}}{L_s} \lambda_{ds} i_{qr} \right) \quad (5.35)$$

Para as potências ativa e reativa no estator, de acordo com as equações (5.19) e (5.20)

$$P^{abc/s} = \frac{3}{2} v_{qs} i_{qs}$$

$$P^{abc/s} = -\frac{3}{2} v_{qs} \frac{M_{rs}}{L_s} i_{qr} \quad (5.36)$$

$$Q^{abc/s} = \frac{3}{2} v_{qs} i_{ds}$$

$$Q^{abc/s} = \frac{3}{2} v_{qs} (\lambda_{ds} - M_{rs} i_{dr}) \quad (5.37)$$

Com isso conclui-se a derivação do modelo nas variáveis de eixo orientado e verifica-se o desacoplamento, através das componentes da corrente do rotor nos eixos d e q em relação às potências reativa e ativa respectivamente [10].

Esta constatação é uma característica muito importante da máquina de dupla alimentação, pois demonstra que através do controle adequado da alimentação do circuito rotórico pode-se, além de ajustar a potência reativa, controlar a potência ativa gerada pelo estator e entregue ao sistema. Em comparação com geradores síncronos associados a hidrelétricas convencionais, onde o controle de potência ativa é realizado pela abertura das palhetas do distribuidor através da atuação dos reguladores de velocidade, a máquina de dupla alimentação apresenta grandes vantagens. Nas máquinas convencionais, enquanto esta regulação possui uma ordem de grandeza de segundos em face da inércia da massa hidráulica, esta máquina pode apresentar constantes de tempo da ordem de milisegundos, associados ao tempo de resposta dos conversores de frequência presentes na alimentação do rotor.

Foi verificado em [19,38] que em face desta propriedade, existem estudos de prevenção contra a ocorrência de instabilidade de tensão de curto prazo que ao considerar medidas de controle de potência ativa, indicam a aplicação de máquinas de dupla alimentação ao invés das clássicas medidas de aumento da capacidade de controle de tensão através do suprimento de potência reativa por compensadores estáticos (STATCOM ou SVC). Verificou-se também que estas medidas só foram propostas recentemente devido às máquinas síncronas convencionais possuírem tempo de resposta muito lento, não sendo adequadas para este ajuste.

### **5.3 Modelo para Operação em Regime Permanente**

Partindo do modelo completo nas variáveis de Park, generalizadas conforme definido anteriormente, pode-se obter o modelo matemático para o regime permanente.

Em regime, as tensões, correntes e enlaces referidos aos eixos d e q síncronos aparecem como grandezas contínuas. Por isso serão anuladas as suas derivadas no

tempo e, considerando a operação balanceada, serão eliminadas as equações referentes às componentes de seqüência zero.

Adotando como referência o eixo girante com velocidade síncrona do estator ( $\omega_s$ ), tem-se:

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad (5.38)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = s\omega_s = \omega_s - \omega_r \quad (5.39)$$

Sendo  $s$  o escorregamento  $\omega_r$  a velocidade do rotor.

Admitindo-se essas premissas, tem-se:

$$V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \lambda_{qs}$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} - \omega_s \lambda_{ds}$$

$$V_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \lambda_{qr}$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} - (\omega_s - \omega_r) \lambda_{dr}$$

Substituindo os enlaces de fluxo nas equações do estator, tem-se:

$$V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s L_s i_{qs} - \omega_r M_{sr} i_{qr}$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s L_s i_{ds} + \omega_r M_{rs} i_{dr}$$

Adotando a forma fasorial,  $\hat{V}_s = V_{ds} + jV_{qs}$

$$\hat{V}_s = R_s \hat{I}_s + j(\omega_s L_s \hat{I}_s + \omega_r M_{rs} \hat{I}_r), \text{ ou} \quad (5.40)$$

$$\hat{V}_s = (R_s + j\omega_s L_s) \hat{I}_s + j\omega_s M_{rs} \hat{I}_r \quad (5.41)$$

Analogamente, para o rotor, fazendo  $\omega_s - \omega_r = s\omega_s$  e  $\hat{V}_r = V_{dr} + jV_{qr}$ , tem-se

$$\hat{V}_r = R_r \hat{I}_r + js(\omega_s L_r \hat{I}_r + \omega_s M_{rs} \hat{I}_s) \quad (5.42)$$

ou ainda, dividindo toda a equação por S:

$$\frac{\hat{V}_r}{s} = \left( \frac{R_r}{s} + j\omega_s L_r \right) \hat{I}_r + j\omega_s M_{rs} \hat{I}_s \quad (5.43)$$

Assim, chega-se as equações para regime permanente expressas nas grandezas fasoriais:

$$\hat{V}_s = (R_s + j\omega_s L_s) \hat{I}_s + j\omega_s M_{rs} \hat{I}_r$$

$$\frac{\hat{V}_r}{s} = \left( \frac{R_r}{s} + j\omega_s L_r \right) \hat{I}_r + j\omega_s M_{rs} \hat{I}_s$$

Estas relações podem ser apresentadas através do circuito equivalente da Figura 5.4:

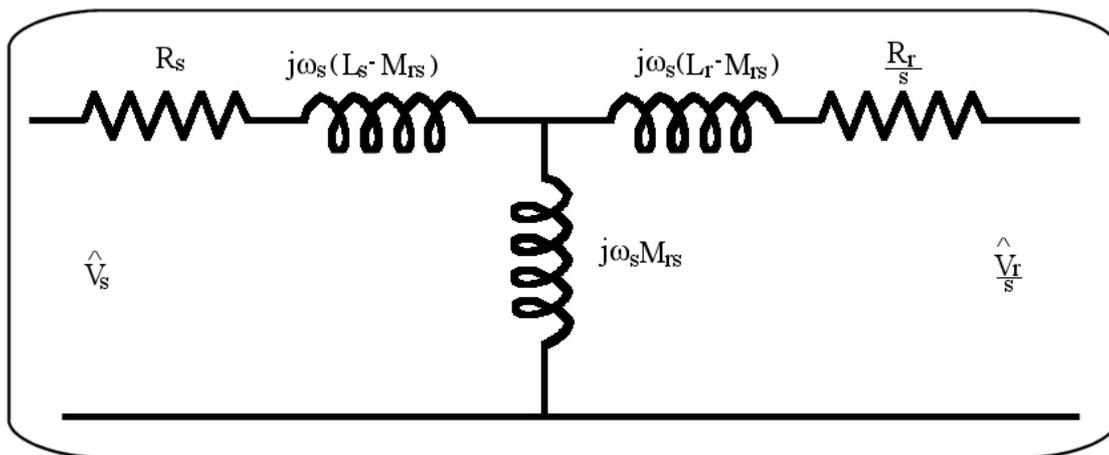


Figura 5.4 - Circuito Equivalente

Que pode ser mais convenientemente apresentado através da conversão para um circuito T referido ao estator. Adotando-se a relação de espiras estator-rotor

$$a = \frac{N_s}{N_r} \text{ tem-se:}$$

$$\hat{V}_s = (R_s + j\omega_s L_s) \hat{I}_s + aj\omega_s M_{rs} \frac{\hat{I}_r}{a} \quad (5.44)$$

$$a \frac{\hat{V}_r}{s} = \left( a^2 \frac{R_r}{s} + a^2 j\omega_s L_r \right) \frac{\hat{I}_r}{a} + aj\omega_s M_{rs} \hat{I}_s \quad (5.45)$$

Assim, tem-se o circuito da Figura 5.5:

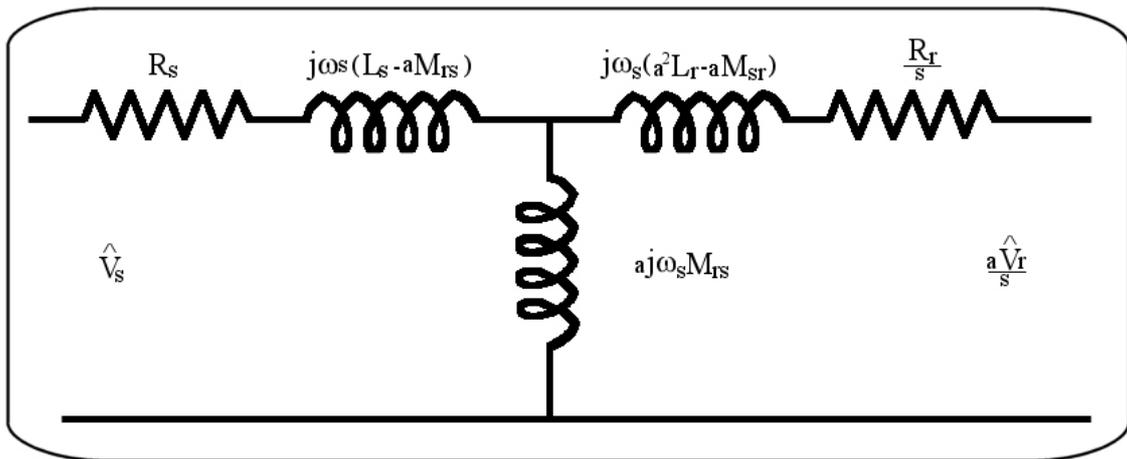


Figura 5.5 – Circuito “ T ” Referido ao Estator

fazendo,

$$j\omega_s L_s - aj\omega_s M_{rs} = Xl_s \quad (5.46)$$

$$a^2 j\omega_s L_r - aj\omega_s M_{rs} = Xl_r \quad (5.47)$$

$$X_m = aM_{rs} \quad (5.48)$$

$$\frac{\hat{I}_r}{a} = \hat{I}_r' \quad (5.49)$$

$$\frac{a^2 R_r}{s} = \frac{R_r'}{s} \quad (5.50)$$

$$a \frac{\hat{V}_r}{s} = \frac{\hat{V}_r'}{s} \quad (5.51)$$

Chega-se ao circuito final, apresentado na Figura 5.6 a seguir:

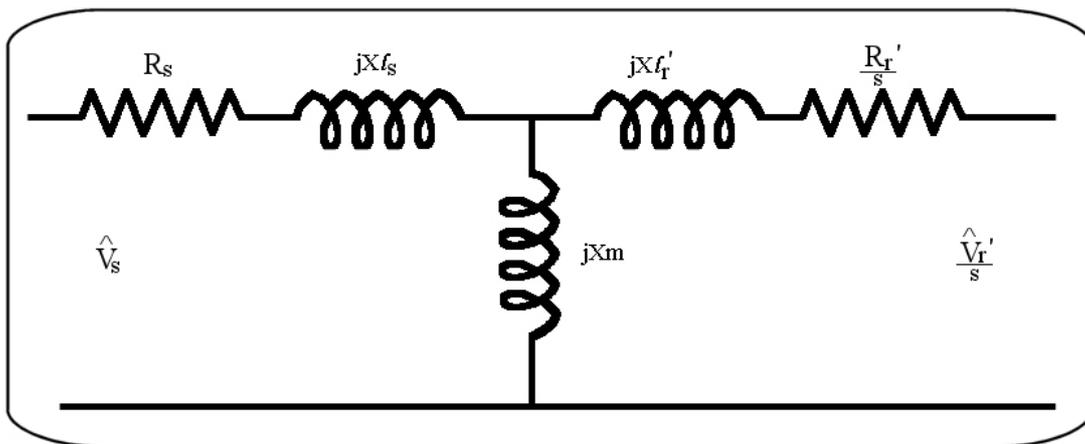


Figura 5.6 - Circuito “ T ” Completo

Onde  $Xl_s$  é a indutância de dispersão do estator,  $Xl_r$  a indutância de dispersão do rotor referida ao estator,  $R_s$  a resistência do estator,  $\frac{R_r}{s}$  a resistência do rotor referida ao estator e  $X_m$  a indutância de magnetização.

## 5.4 Simulação dinâmica

Neste item serão apresentados os resultados obtidos com a simulação dinâmica da máquina de dupla alimentação. Foi realizada uma avaliação dos programas disponíveis que ofereciam a representação da máquina de dupla alimentação e verificou-se a possibilidade de utilização dos programas Digsilent [9,21], Matlab/Simulink e ANATEM [23]. A opção pela utilização do programa ANATEM foi devido à sua grande flexibilidade de utilização de CDUs (controles definidos pelo usuário) e interface de entrada de dados largamente utilizada e bastante conhecida. Desta forma, o sistema foi simulado através da determinação do ponto de operação pelo programa de cálculo de fluxo de potência ANAREDE versão Jan 03/Beta 2 e a representação da máquina de dupla alimentação foi realizada utilizando o programa de estabilidade eletromecânica ANATEM versão Abr 04/Beta 4, ambos desenvolvidos pelo CEPEL.

Nesta versão do ANATEM foram modelados os conversores FACTS VSI PWM [11,22] e a máquina de dupla alimentação, atendendo à necessidade de simulação de integração de parques eólicos ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Desta forma, foi possível realizar a simulação da máquina duplamente alimentada, porém acoplada a uma turbina hidráulica.

Para esta simulação foi montado um sistema de potência composto por uma barra infinita, uma barra PV e três barras PQ. Foram utilizados os dados de uma máquina de dupla alimentação da referencia [35], apresentados na Tabela 5.1 a seguir:

**Tabela 5.1 – Parâmetros da Máquina de Indução de Dupla Alimentação**

Parâmetro	Valor
Potência nominal	475 MVA
Tensão	18 kV
Constante de inércia	8 s
Resistência do estator	0,0013 pu
Reatância de dispersão do estator	0,085 pu
Resistência do rotor	0,0011 pu
Reatância de dispersão do rotor	0,11 pu
Reatância de magnetização	2,3 pu
Elo CC	3,6 kV
Capacitor	15000 $\mu$ F

Para a representação da turbina hidráulica, como não foi encontrada na literatura nenhuma referência acerca da sua modelagem para estudos em velocidade ajustável, foi utilizada a sua representação padrão IEEE, com representação do seu regulador de velocidade com o servomotor de atuação no distribuidor e seus estatismos permanente e transitório [16].

A representação realizada está apresentada na Figura 5.7:

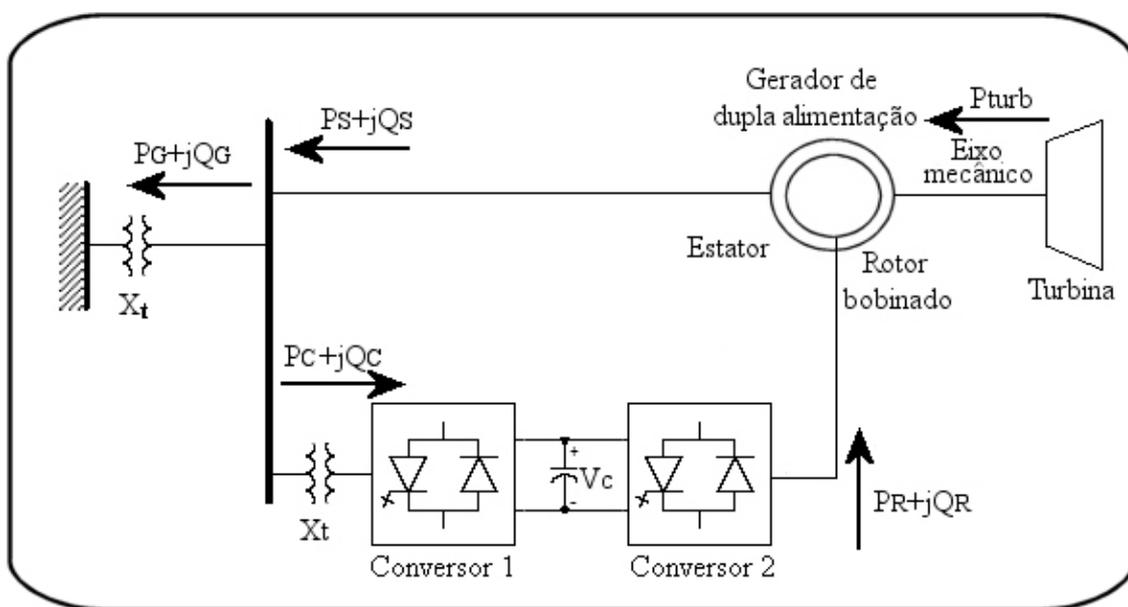


Figura 5.7 - Representação da Máquina de Dupla Alimentação

Para os conversores de alimentação do campo do rotor, principal dispositivo para o funcionamento do gerador de dupla alimentação, foi adotada uma estratégia de controle similar à utilizada para o controle de geradores eólicos. Como cada conversor VSI – conversor 1 (estator) e conversor 2 (rotor) possui duas variáveis de controle, que são o módulo e fase da tensão CA aplicada ao sistema em que está conectado, é possível controlar duas variáveis do sistema CA por conversor. Desta forma cada terminal dos conversores seria capaz de controlar a potência ativa e reativa absorvida ou injetada no seu sistema (estator e rotor). Porém, devido ao fato da necessidade de se exercer um controle da tensão CC do capacitor do elo de interligação dos conversores, o canal de potência ativa do conversor 1, não pode exercer o controle sobre o seu fluxo de potência

ativa e, portanto, passa a desempenhar o controle da tensão do capacitor. Desta forma, este conversor fica determinado como conversor de folga e esta constatação já apresenta a limitação do grau de liberdade de controle de um equipamento FACTS VSI, isto é, será sempre igual ao número de terminais conversores acoplados pelo lado CC menos 1, pois o conversor de folga terá sempre a responsabilidade de manter seu controle sobre a tensão CC.

Adicionalmente, em razão destes conversores poderem operar com controle de seu fator de potência (indutivo ou capacitivo), diferentemente dos elos de corrente contínua convencionais, a estratégia completa adotada para os conversores é a seguinte:

**Conversor conectado ao estator (conversor 1):**

- Canal de potência ativa: controle da tensão do capacitor do elo CC.
- Canal de potência reativa: controle do fator de potência do conversor ( $Q = 0$ ).

**Conversor conectado ao rotor (conversor 2):**

- Canal de potência ativa: controle da velocidade (escorregamento) da máquina.
- Canal de potência reativa: controle de tensão terminal da máquina.

Estes controles se baseiam em um sinal de referência de fase que são seguidos por um circuito de sincronismo que gera o sinal de referência do conversor, sendo o mesmo feito através de duas componentes: uma em fase e outra em quadratura com o sinal de referência de fase. A escolha de qual variável é controlada por qual componente se baseia na sensibilidade da variável ao sinal de controle.

Para o conversor ligado ao estator tem-se a seguinte configuração.

Utilizou-se como sinal de referência de fase a tensão na barra terminal alinhada com a componente q (quadratura) adiantada de  $90^\circ$  da componente d (direta). Desta forma, a componente do eixo q exerce maior influência no módulo da tensão CA do conversor e por isso será usado no canal de controle de potência reativa, ou controle de fator de potência unitário ( $Q = 0$ ). Por outro lado, como a componente d exerce maior

influência na fase da tensão CA, a mesma será utilizada no controle da tensão do capacitor. Visando facilitar a apresentação, o esquema deste controle é mostrado na Figura 5.8 a seguir:

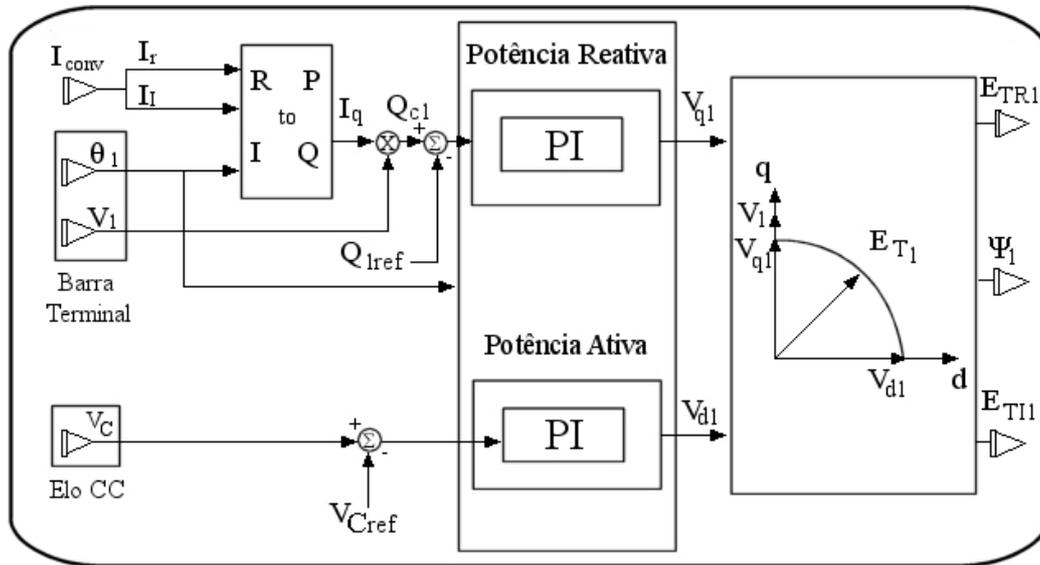


Figura 5.8 - Esquema de Controle do Conversor 1

Para o canal de potência reativa, objetivando-se o cálculo da potência reativa drenada pelo conversor, utilizou-se uma transformação de componentes real e imaginária da corrente para componentes ativa e reativa através da obtenção do ângulo da tensão terminal. Após isso, fez-se o produto pela tensão terminal para se obter a potência reativa consumida ( $Q_{c1} = 0$ ). Este valor é então comparado com a referência ( $Q_{ref} = 0$ ) e o seu erro é entrada para o controle proporcional-integral (PI) que tem como saída a tensão desejada ( $V_{q1}$ ).

Para o canal de potência ativa, o valor da tensão medida no capacitor do elo CC ( $V_c$ ) é comparada com o valor de referencia ( $V_{cref} = 1$ ) e o seu erro é o sinal de entrada para o controle PI que terá como saída a tensão necessária ( $V_{d1}$ ).

A partir das componentes no eixo q ( $V_{q1}$ ) e no eixo d ( $V_{d1}$ ) é calculada a fase da tensão CA do conversor ( $\Psi_1$ ) e do seu módulo ( $E_{T1}$ ).

Para o conversor ligado ao rotor tem-se a seguinte configuração:

Devido o mesmo realizar o ajuste da velocidade de rotação e da tensão terminal da máquina, utilizou-se como sinal de referência de fase a mesma orientação definida no desenvolvimento do modelo orientado pelo fluxo do estator da máquina  $\lambda_s$ . Desta forma as componentes deste controlador ( $V_{d2}$ ), ( $I_{d2}$ ), ( $V_{q2}$ ) e ( $I_{q2}$ ) estão alinhadas com as correntes rotóricas  $I_{dr}$  e  $I_{qr}$  e o controle vetorial da máquina pode ser incorporado nas malhas de controle do conversor. O vetor fluxo do estator  $\lambda_s$  está alinhado com a componente d (direta) e a componente q (quadratura) adiantada de  $90^\circ$  da componente d. Desta forma, a componente do eixo d exerce maior influência no módulo e por isso a mesma será utilizada no controle da tensão terminal, ou geração de potência reativa da máquina. Por outro lado, como a componente q exerce maior influência na fase, ela será usada no canal de controle de potência ativa, ou controle de velocidade da máquina. Visando facilitar a apresentação, o esquema deste controle é mostrado na Figura 5.9 a seguir:

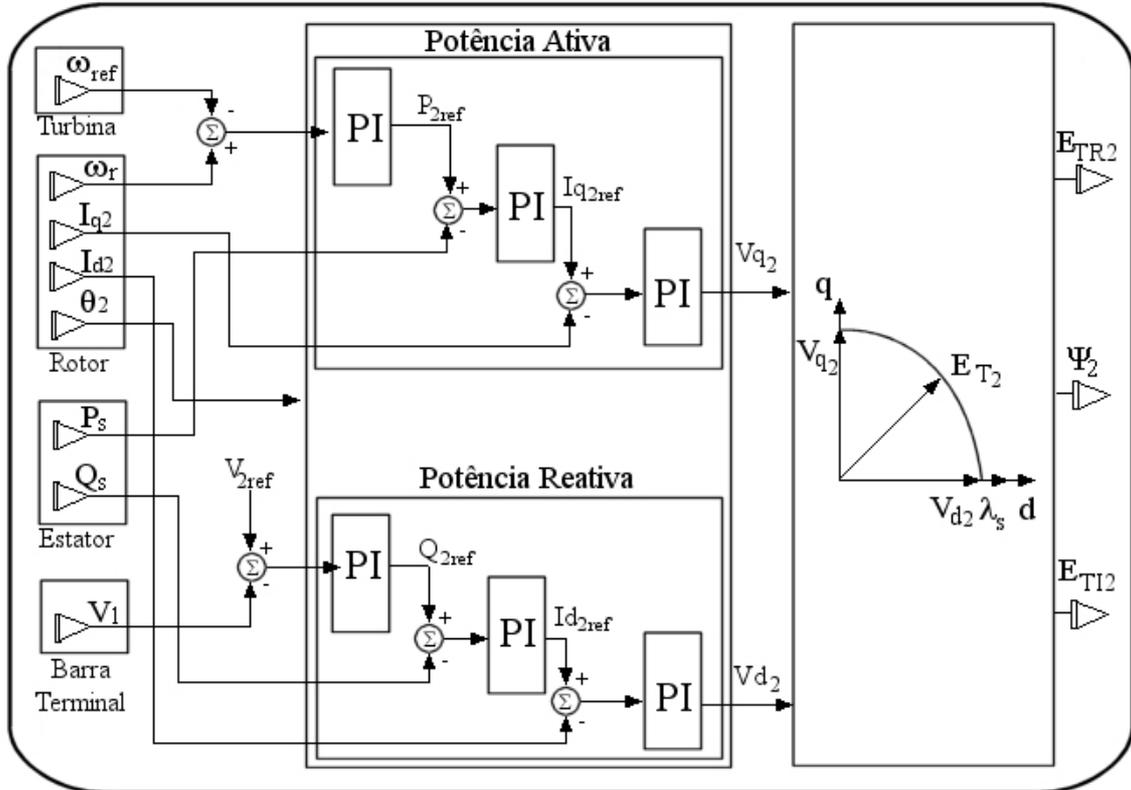


Figura 5.9 - Esquema de Controle do Conversor 2

Para o canal de potência ativa, objetivando o controle da velocidade, existe um laço de controle composto por três blocos PI. Primeiramente realiza-se a comparação entre a velocidade de rotação do rotor ( $\omega_r$ ) e a velocidade de referência otimizada para a maximizar a geração de energia pela turbina ( $\omega_{ref}$ ). A diferença entre esses valores gera um sinal de erro que é entrada para o primeiro controlador PI. Sua saída gera uma referência de potência ( $P_{ref}$ ) que será comparada com a potência ativa gerada pelo estator da máquina ( $P_s$ ). Esta diferença gera outro sinal de erro que alimenta o segundo controlador PI. Esta saída, por sua vez, vai gerar um sinal de referência de corrente rotórica no eixo q ( $I_{q2ref}$ ). Por fim, este valor será comparado com a corrente rotórica do eixo q ( $I_{q2}$ ), sendo a sua diferença o sinal de erro para o terceiro controlador PI. Este fornecerá então, como valor de saída, a tensão desejada ( $V_{q2}$ ).

Para o canal de potência reativa, tem-se também uma configuração com 3 blocos PI. Primeiramente, faz-se uma comparação entre os valores de tensão terminal ( $V_1$ ) e o valor da tensão de referência ( $V_{2ref}$ ). Sua diferença gera um sinal de erro que é entrada para o primeiro controle PI. Este fornece como saída um sinal de referência de potência reativa ( $Q_{2ref}$ ) que será comparado com potência reativa gerada pelo estator da máquina ( $Q_s$ ). Esta diferença gera outro sinal de erro que alimenta o segundo controlador PI. Este segundo controle, tem como saída um sinal de referência de corrente rotórica no eixo d ( $I_{d2}$ ). Por fim, assim como no canal de potência ativa, este valor será comparado com a corrente rotórica do eixo d ( $I_{d2}$ ), sendo a sua diferença o sinal de erro para o terceiro controlador PI. Este, por fim fornecerá como valor de saída, a tensão necessária ( $V_{d2}$ ).

Assim como no conversor do estator, a partir das componentes no eixo q ( $V_{q2}$ ) e no eixo d ( $V_{d2}$ ) é calculada a fase da tensão CA do conversor ( $\Psi_2$ ) e do seu módulo ( $E_{T2}$ ).

De forma a promover uma visão geral, a Figura 5.10 a seguir procura apresentar, de forma simplificada, toda a estrutura de controle envolvida.

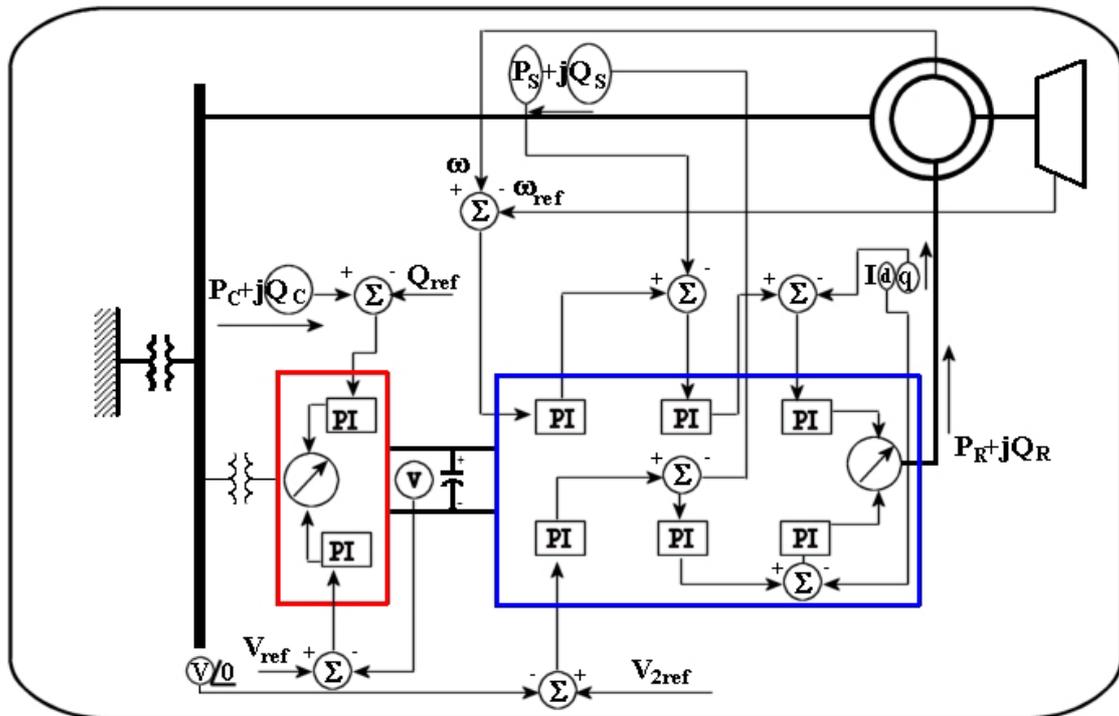


Figura 5.10 - Esquema de Controle Completo

Vale destacar que todos os valores dos ganhos dos controladores PI foram determinados por tentativa e erro, com análise no domínio do tempo através da simulação de estabilidade eletromecânica. Esta opção se mostrou extremamente exaustiva e complexa, tendo em vista a grande quantidade de controladores envolvidos e a forte interação entre as respostas dos mesmos. Conforme verificado em [22], a aplicação da linearização para análises de pequenas perturbações em torno de um ponto de operação, embora possa parecer muito mais trabalhosa de início, pois exige a linearização das equações para o lado CC e CA dos conversores VSI e de seus controles, permite a utilização de técnicas baseadas no cálculo de autovalores como diagrama do lugar das raízes e na resposta em frequência como o diagrama de Nyquist, para o projeto destes controladores. Foi verificado também em [22] que no caso de projeto de controle de um STATCOM, a aplicação do cálculo dos fatores de participação para a determinação de qual variável do modelo possuía mais influência em

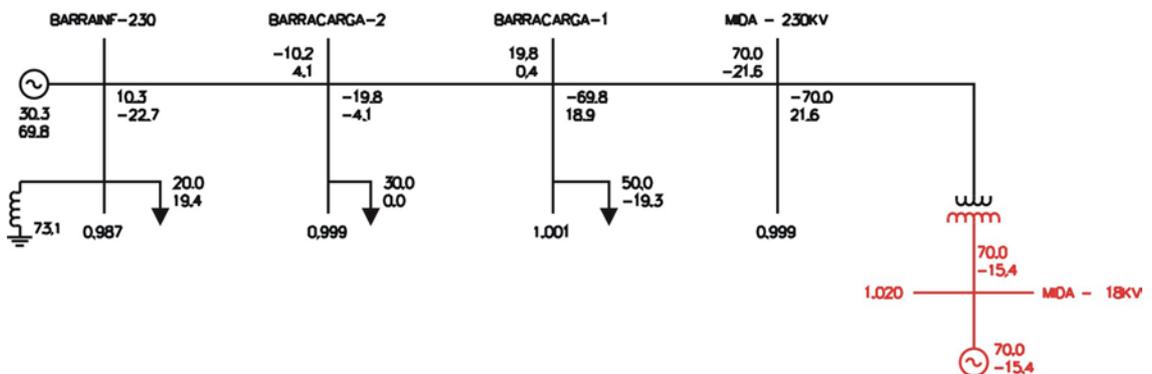
um certo autovalor permitiu identificar a natureza dos modos de oscilação e de seus amortecimentos.

O objetivo principal da simulação dinâmica foi demonstrar a característica de maior estabilidade transitória desta máquina em razão da rápida resposta de injeção de potência ativa proporcionada pela alteração da velocidade de rotação da turbina hidráulica [29,30,31].

Para isto foram simulados casos com a máquina de dupla alimentação funcionando como gerador e motor, além de outro com uma máquina síncrona de forma a comprovar o melhor comportamento dinâmico da máquina de dupla alimentação.

**Caso 1**

Para esta simulação foi determinado o seguinte caso de fluxo de potência:



**Figura 5.11 - Sistema de Potência - Caso 1**

Resultando no seguinte ponto de operação para a máquina de dupla alimentação funcionando como gerador, de acordo com a Tabela 5.2:

**Tabela 5.2 – Ponto de Operação do Caso 1**

Item	Valor
Tensão Terminal	1,02 pu
Potência Ativa Gerada	70,00 MW
Potência Ativa do Estator	65,16 MW
Potência Ativa do Rotor	4,83 MW
Potencia Reativa	-15,4 MW
Velocidade	1,08 pu
Escorregamento	-7,995 %

Ocorrência:

Degrau de redução de 10% da velocidade de rotação de referência da turbina hidráulica em 3,0 s.

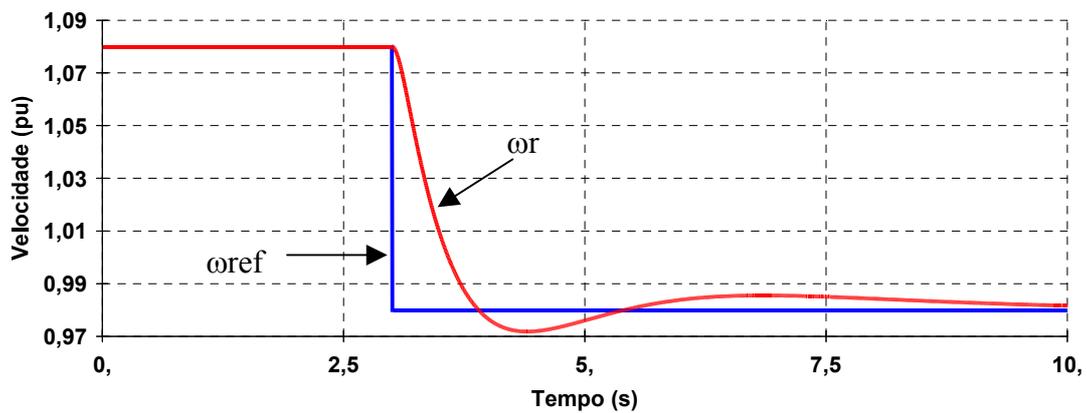


Figura 5.12 - Degrau na Referência de Velocidade

Verifica-se a variação do escorregamento, passando para valor positivo (velocidade sub-síncrona)

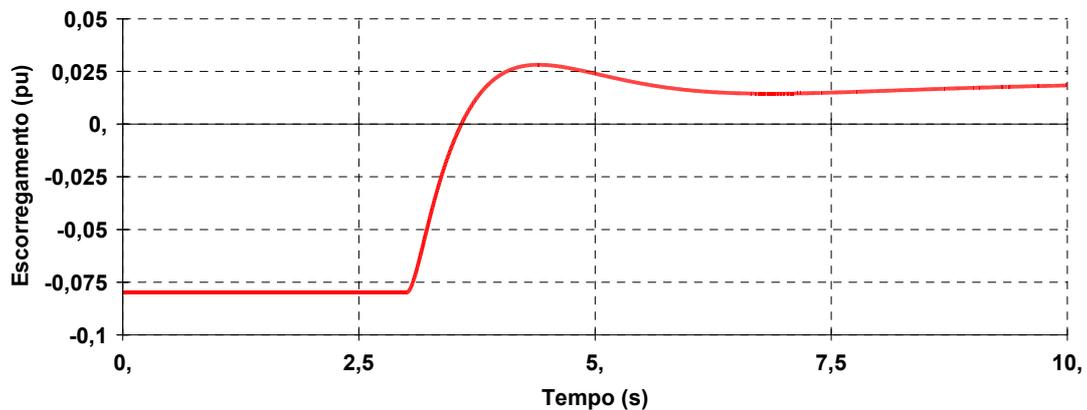


Figura 5.13 – Escorregamento do Gerador

Observa-se pequena variação da tensão do elo CC

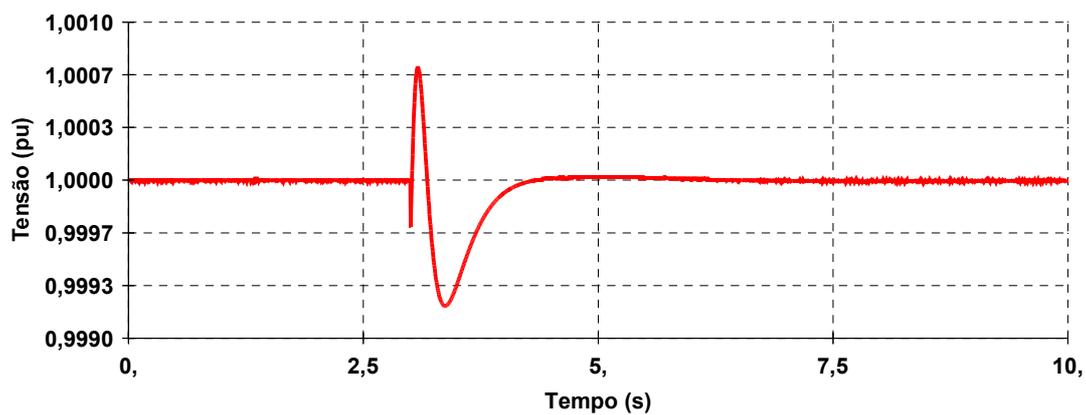


Figura 5.14 - Tensão no Capacitor do Elo CC

Observa-se pequena variação nas tensões CA da barra terminal do gerador (18 kV) e da usina (230 kV)

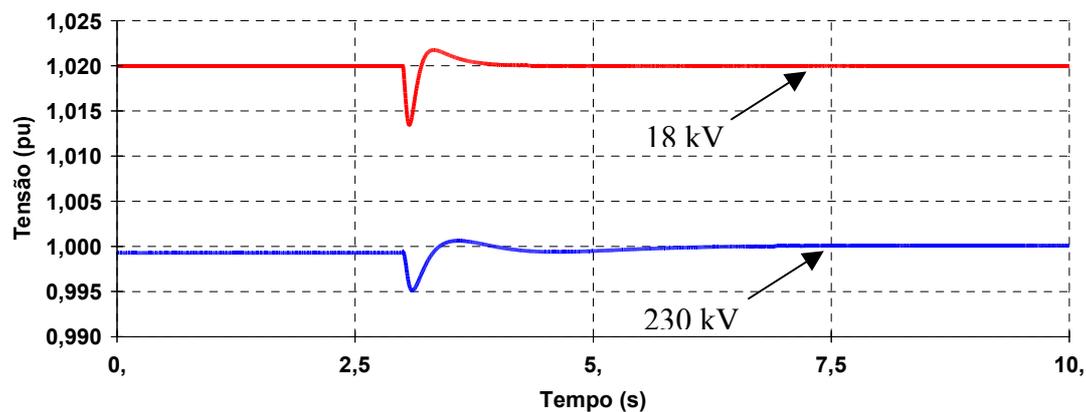


Figura 5.15 - Tensões nas Barras do Gerador e da Usina

Devido à passagem da velocidade sobre-síncrona para sub-síncrona, observa-se a alteração do sentido do fluxo de potência ativa no conversor do rotor.

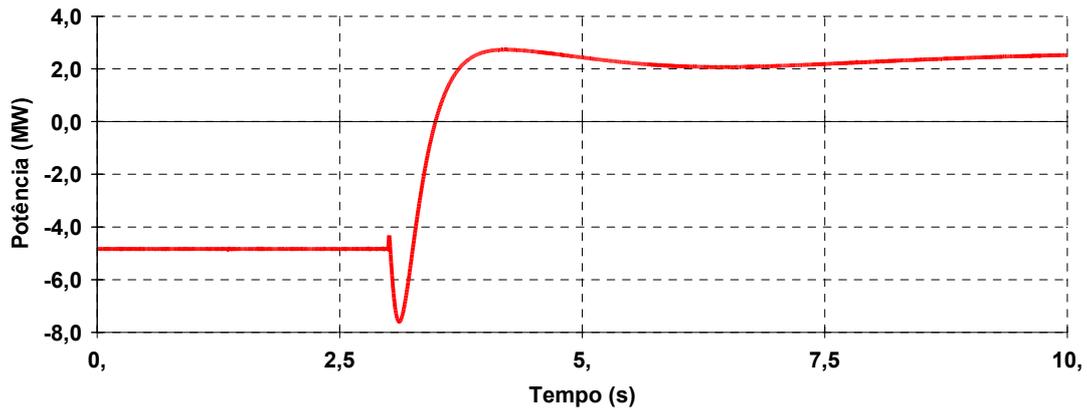


Figura 5.16 - Potência Ativa no Conversor 1

Apesar da mudança do sentido da potência ativa, o controle do conversor do estator mantém o fator de potência do conversor igual a 1 ( $Q_{ref} = 0$ ).

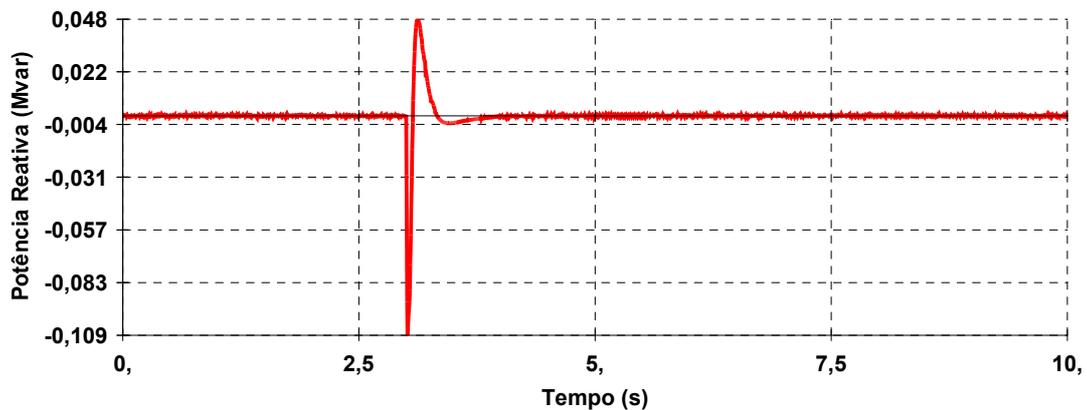


Figura 5.17 - Potência Reativa no Conversor 1

Apesar da redução de 10% da velocidade, a máquina apresenta somente variação de cerca de 0,7% na sua frequência.

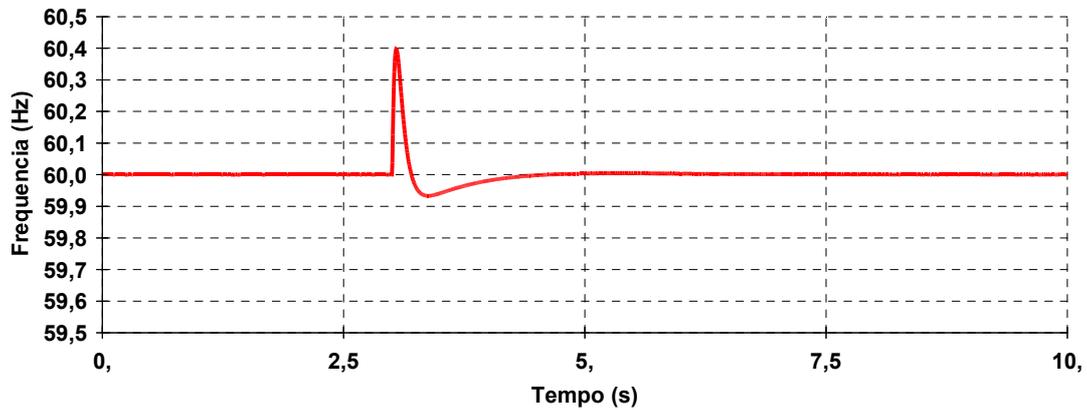


Figura 5.18 - Frequência na Barra do Gerador

Finalmente, verifica-se a injeção de potência ativa por um curto período devido a redução da rotação da turbina, acompanhada pela inversão do fluxo de potência no rotor com a operação em velocidade menor que a velocidade síncrona.

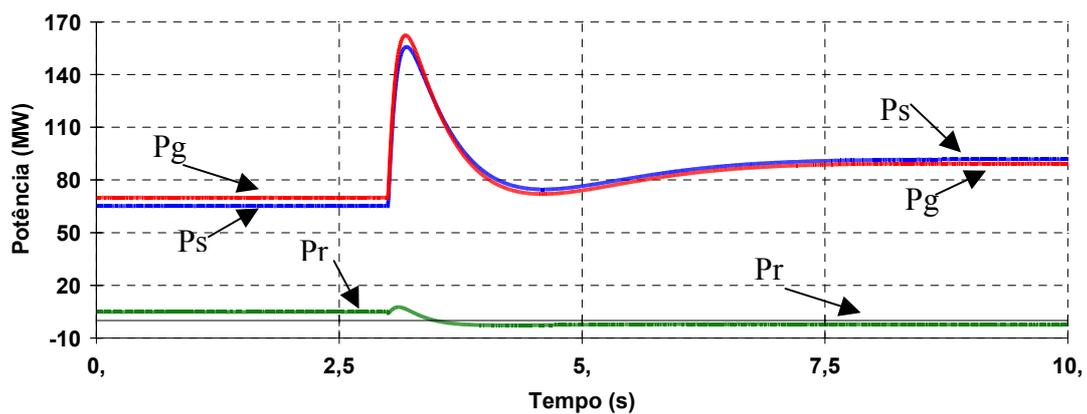


Figura 5.19 - Potências no Gerador de Dupla Alimentação

## Caso 2

Para esta simulação foi determinado o seguinte caso de fluxo de potência:

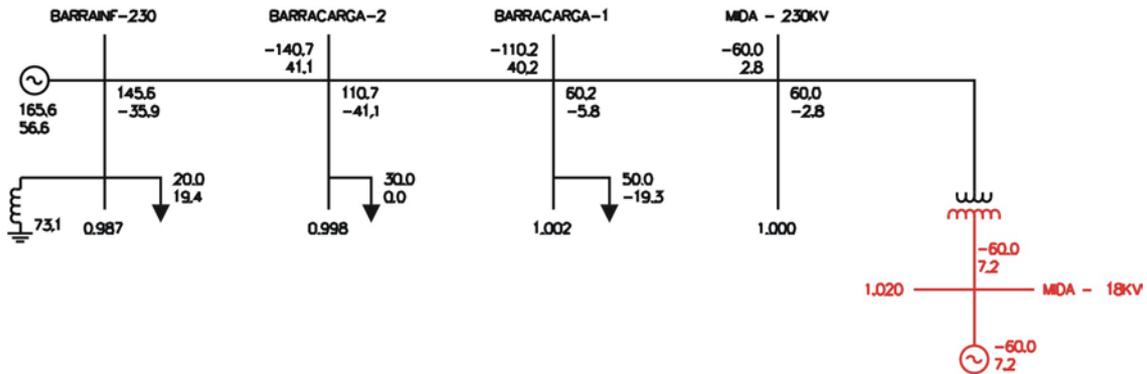


Figura 5.20 - Sistema de Potência – Caso 2

Resultando no seguinte ponto de operação para a máquina de dupla alimentação funcionando como motor, de acordo com a Tabela 5.3: (neste item adotou-se a conversão motor)

Tabela 5.3 – Ponto de Operação do Caso 2

Item	Valor
Tensão Terminal	1.02 pu
Potência Ativa Consumida	60,00 MW
Potência Ativa do Estator	61,15 MW
Potência Ativa do Rotor	-1,15 MW
Potencia Reativa	-7,2 MW
Velocidade	0,97 pu
Escorregamento	2,58 %

Ocorrência:

Degrau de redução de 10% da velocidade de rotação de referência da turbina hidráulica em 2,0 s com retorno ao valor inicial em 3,5 s.

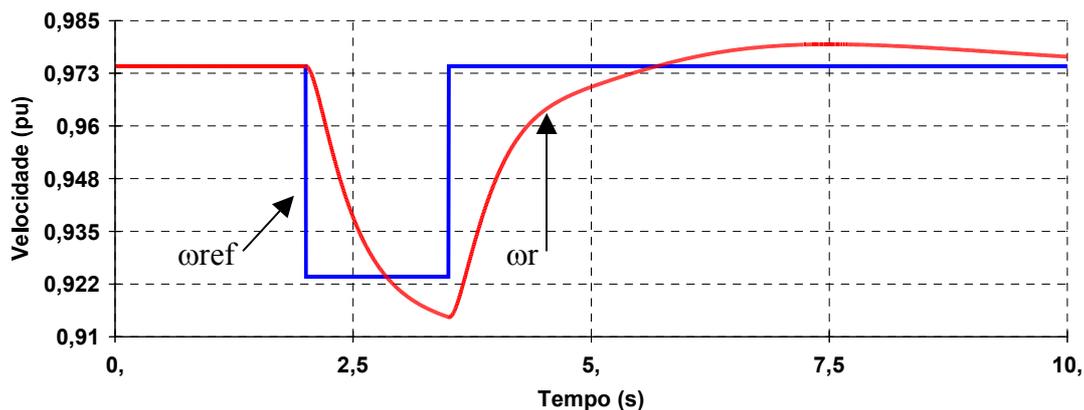


Figura 5.21 - Aplicação e Retirada do Degrau na Referência de Velocidade

Varição com aumento do escorregamento durante o degrau, com o seu retorno após retirada da perturbação. Motor sempre operando com escorregamento positivo.

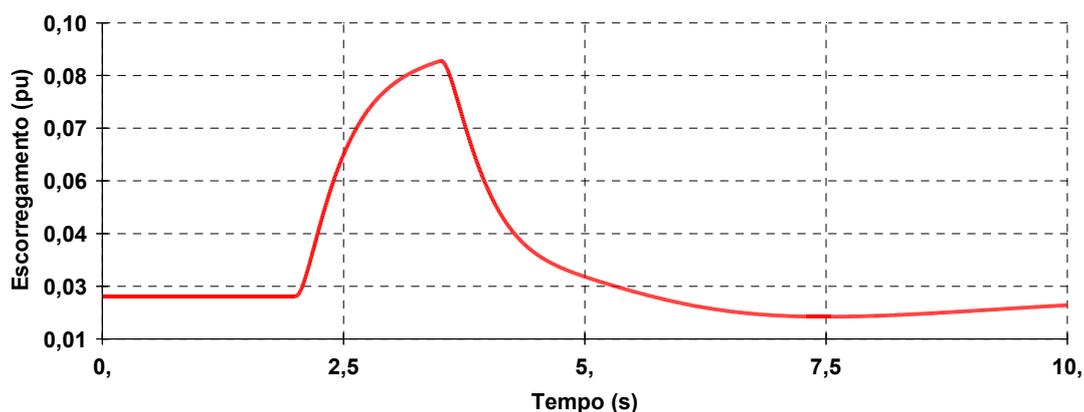


Figura 5.22 – Escorregamento do Motor

Variação muito pequena na freqüência da tensão terminal do motor.

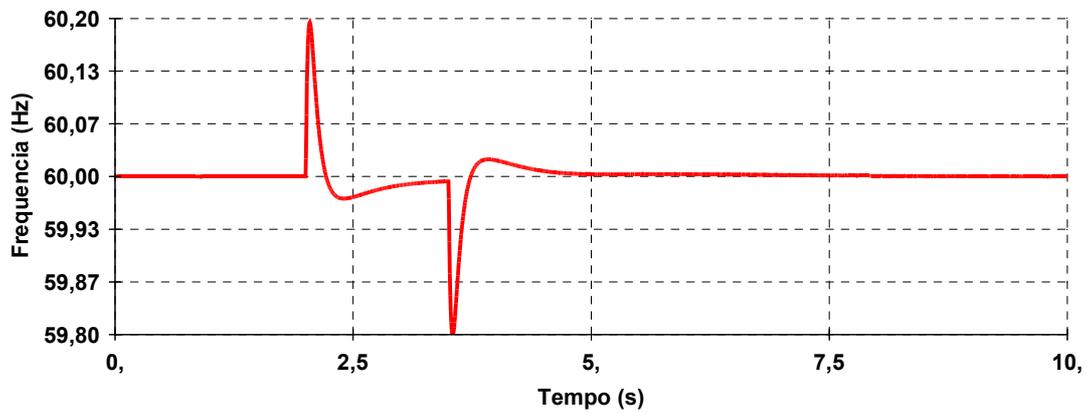


Figura 5.23 – Freqüência da Barra do Gerador

Observa-se a variação no consumo de reativo pelo motor, visando exercer o controle sobre a sua tensão terminal.

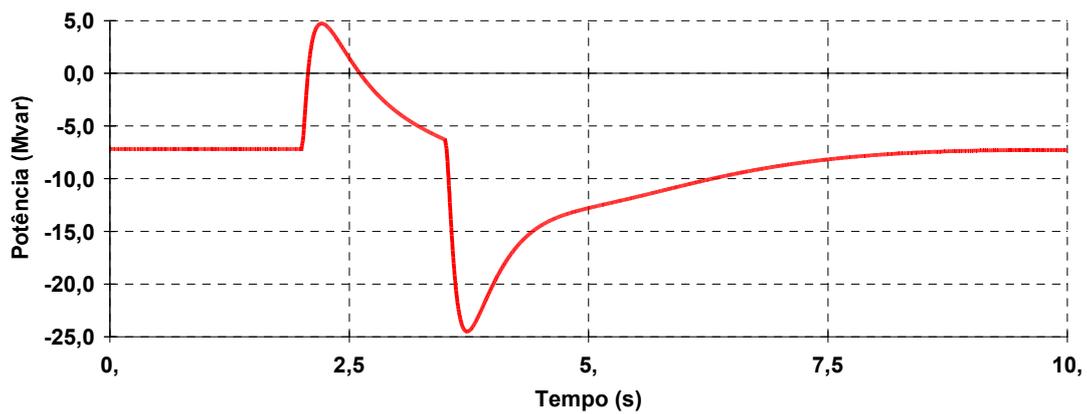


Figura 5.24 - Potência Reativa no Motor

Pequena variação observada no valor da tensão terminal.

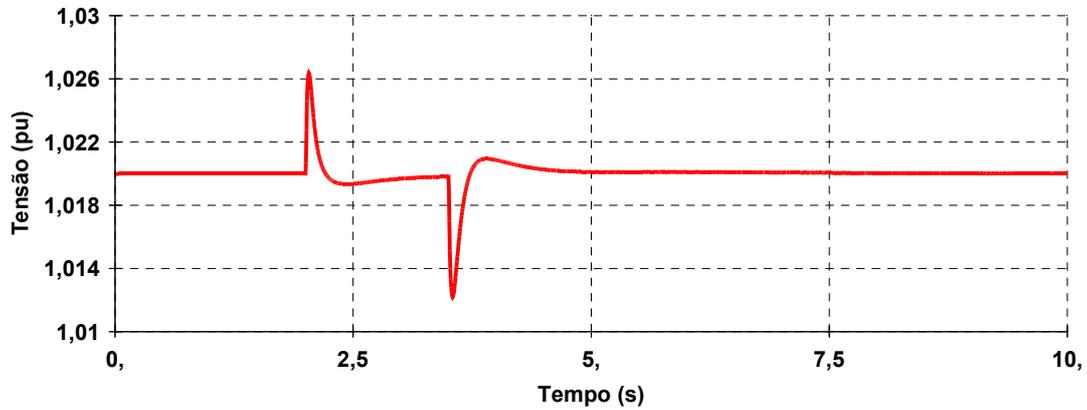


Figura 5.25 – Tensão na Barra do Gerador

Demonstração de que mesmo em operação motora, a máquina de dupla alimentação pode auxiliar no amortecimento de oscilações de potência, através do intercâmbio de energia com a “massa girante”

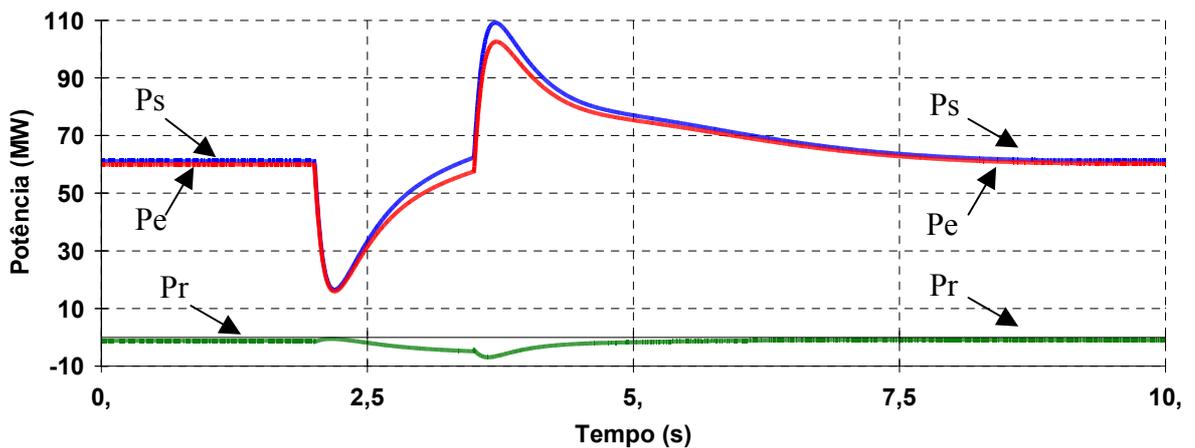


Figura 5.26 - Potências no Motor de Dupla Alimentação

### Caso 3

Para esta simulação foi utilizado o mesmo caso de fluxo de potência do caso 1, com a máquina funcionando como gerador com despacho inicial de 70 MW:

Ocorrência:

Curto circuito nos terminais do gerador em 2,0 s e retirada em 2,25 s. Curto através de impedância com afundamento da tensão terminal para 0,65 pu.

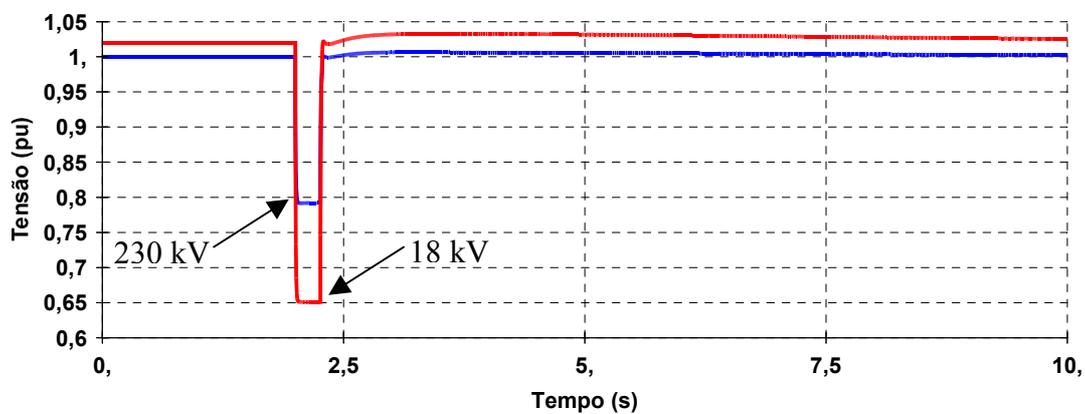


Figura 5.27 - Tensões na Barra do Gerador e no 230 kV

Nesta ocorrência, foi ativada a proteção crowbar através da sobrecorrente no estator. Esta proteção aplicou uma impedância no rotor e bloqueou os conversores.

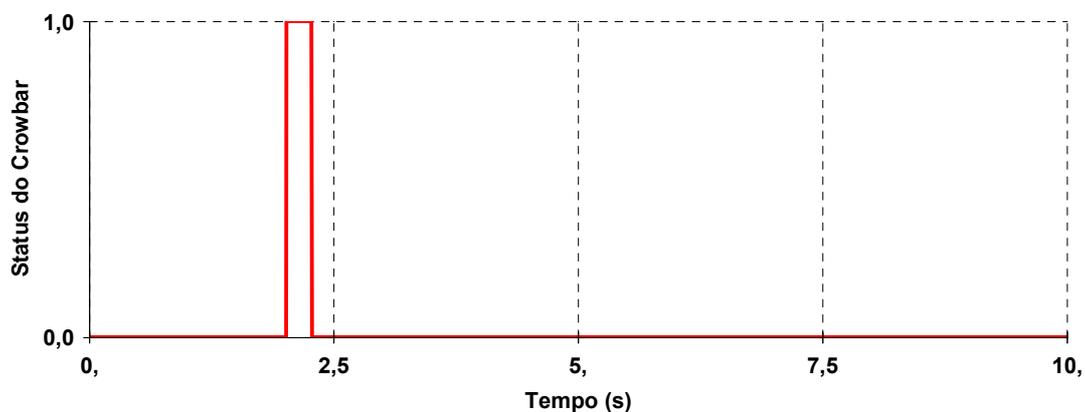


Figura 5.28 - Status de Operação da Proteção Crow-Bar

Verifica-se o rápido aumento da velocidade, uma vez que com a atuação do crow-bar ocorre um desbalanço com redução da potência entregue pela máquina, logo, a máquina acelera. Após a desativação do crow-bar, a atuação dos controles dos conversores traz a máquina de volta a sua condição inicial.

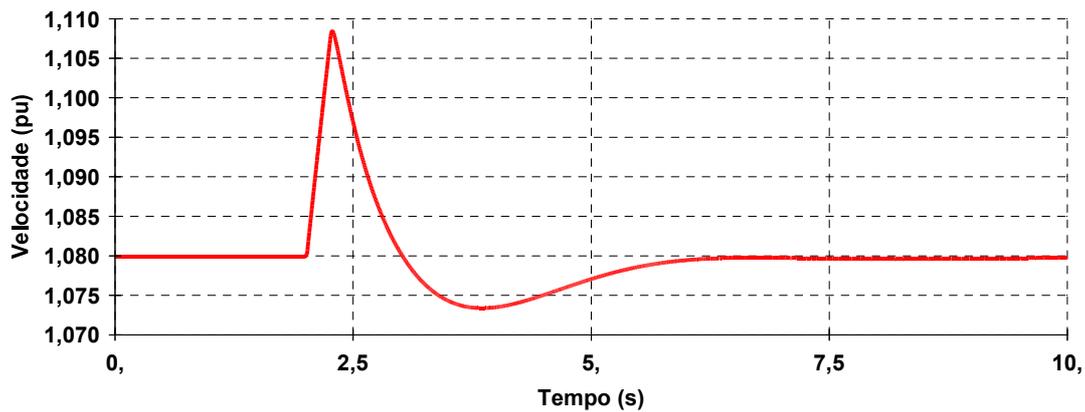


Figura 5.29 – Velocidade de Rotação do Rotor

Verifica-se a redução capacidade de na geração de potência ativa durante a perturbação. Após a desativação do crow-bar a máquina volta a entregar potência ao sistema.

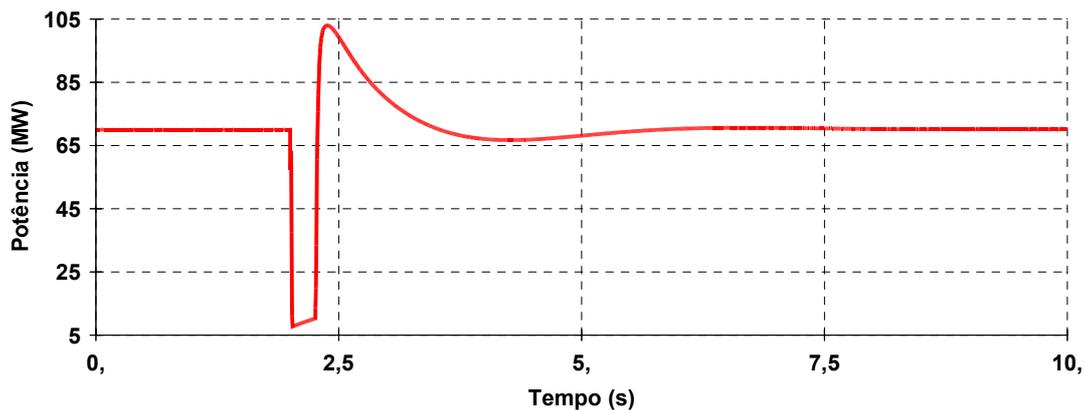


Figura 5.30 - Potência Ativa nos Terminais do Gerador

## Comparação com a máquina síncrona convencional

Para esta simulação foi utilizado o mesmo caso de fluxo de potência do caso 3, sendo que a máquina de dupla alimentação foi substituída por uma máquina síncrona convencional de mesmo porte que a máquina de indução. De forma a comprovar o melhor comportamento dinâmico da máquina de indução, foi aplicado o mesmo distúrbio do caso anterior, porém com simulação da dinâmica por 20 segundos:

Observa-se com a aplicação do curto a máquina passa a o oscilar em torno da frequência síncrona por um longo intervalo de tempo, mesmo após a normalização do distúrbio.

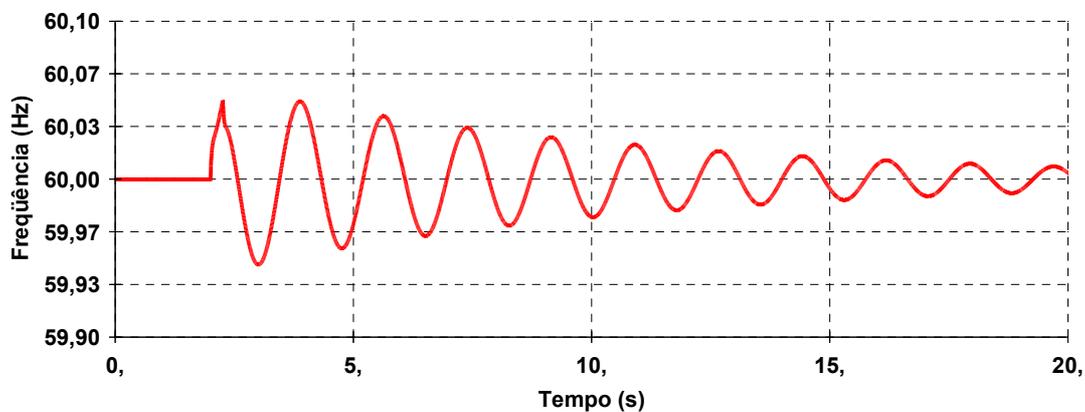


Figura 5.31 – Frequência nos Terminais do Gerador

Observa-se uma grande oscilação de potência com um baixo amortecimento, permitindo a permanência da perturbação por um grande intervalo de tempo.

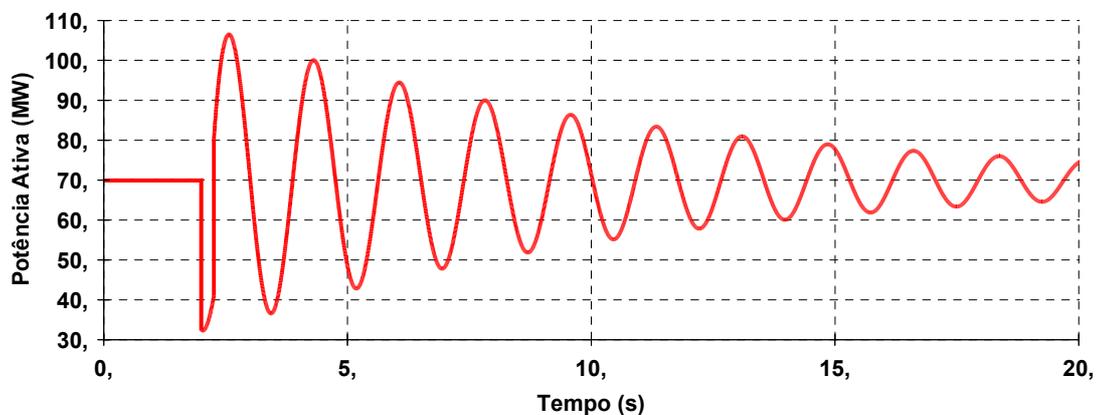


Figura 5.32 - Potência Ativa nos Terminais do Gerador

## **5.5 Análise final das simulações**

A simulação da máquina de indução de dupla alimentação ligada à uma turbina hidráulica através dos programas ANAREDE e ANATEM do CEPEL se mostrou bastante eficiente. Através desta foi possível comprovar funcionamento da mesma, e com pequenas modificações na sua representação foi apresentado o seu funcionamento em modo motor e em modo gerador.

É importante destacar que na análise de regime permanente ainda não é possível representar os conversores, pois os mesmos ainda não foram modelados no programa de fluxo de potência ANAREDE.

Ficou comprovado o correto funcionamento dos conversores, bem como a capacidade de recuperação de energia do modo motor quando o mesmo funciona abaixo da velocidade síncrona e conseqüentemente alimenta o estator. No modo gerador, pode-se comprovar que após o distúrbio, quando a operação passa a ser em velocidade sub-síncrona, o rotor que anteriormente estava fornecendo potência ao sistema, necessita agora absorver potência ativa do mesmo.

Foi possível também ajustar a proteção crow-bar para que na ocorrência de um distúrbio no sistema elétrico a mesma bloqueie o funcionamento dos conversores e aplique uma impedância nos terminais do rotor.

Por fim, foi comprovado o melhor comportamento dinâmico da máquina de indução de dupla alimentação em relação à máquina síncrona convencional através do rápido amortecimento das oscilações.

## Capítulo 6

# Conclusões e Trabalhos Futuros

### 6.1 Conclusões

Este trabalho apresentou os diversos ganhos obtidos com a utilização de rotação ajustável aliada ao uso de máquinas de indução de dupla alimentação em usinas hidrelétricas.

A possibilidade de operação em velocidade de rotação ajustável, marco inicial deste estudo, oferece a viabilidade do aumento do rendimento do processo de conversão eletromecânica de energia. Porém, este se mostrou apenas como a “ponta do iceberg”, haja vista que a partir deste ponto outras soluções foram apresentadas e passaram a agregar diversos benefícios a esta nova tecnologia.

As novas diretrizes das políticas ambientais, que atualmente não consideram mais a geração hidrelétrica como uma das formas mais limpas e menos agressoras ao meio ambiente também exercem influência na busca de outras soluções que pudessem minimizar os seus impactos sociais e ambientais.

A questão da água, presente no desafio do desenvolvimento sustentável e aliada com a nova regulamentação de usos múltiplos, eliminou a prioridade da geração de energia frente aos outros usos, e desta forma exerce maiores restrições para a geração hidrelétrica que agora precisa ser mais flexível para se adaptar a este novo cenário.

O desenvolvimento atual da eletrônica de potência, permite a utilização de máquinas de dupla alimentação com conversores estáticos no rotor e viabilizam a sua integração com as turbinas hidráulicas, possibilitando realizar a quebra da “camisa de força” que as mantinha em velocidade de rotação fixa, embora sendo máquinas de fluxo de velocidade variável.

A possibilidade de intercâmbio de potência entre a “massa girante” e o sistema elétrico, faz com a máquina de dupla alimentação possa injetar ou absorver potência ativa do sistema em um intervalo de tempo muito reduzido. Seu controle de geração de potência ativa através das correntes aplicadas pelos conversores do rotor, possibilita a regulação de potência, tanto no modo motor como gerador, sem as constantes de tempo existentes nos geradores convencionais ajustados pela atuação das palhetas no distribuidor da turbina.

O sistema elétrico de potência passa a deter maior capacidade de manter-se estável face ao aumento da estabilidade transitória que esta máquina pode oferecer, podendo ainda ser aplicada para controle de potência ativa na prevenção da instabilidade de tensão.

A simulação dinâmica de um sistema de potência com a representação da máquina de dupla alimentação mostrou-se eficiente inclusive para a operação como motor e comprovou que a mesma pode auxiliar na manutenção da estabilidade angular.

Os benefícios advindos da integração desta máquina, tanto para o sistema elétrico de potência, sistema hidroenergético, sistema mecânico e para o meio ambiente, se mostram muito atraentes, fazendo com que a sua adoção não seja confirmada somente por um estudo de viabilidade econômica, mas que leve em consideração também todos os ganhos anteriormente descritos.

## **6.2 Trabalhos Futuros**

Entre os trabalhos que podem ser desenvolvidos como continuação deste, pode-se destacar:

- Visando um projeto mais adequado para os controladores dos conversores VSI, indica-se o trabalho de linearização de todas as equações do lado CC e CA, bem como de seus controles, para uma análise de autovalores. Pode-se também aplicar técnicas de controle avançadas como os algoritmos genéticos ou lógica fuzzy visto

que estas são grandes ferramentas que já vem sendo utilizadas com sucesso no projeto de ganhos de controladores.

- Levantamento das reduções dos impactos ambientais que podem ser proporcionados com a adoção desta tecnologia em usinas existentes ou em novos projetos.
- Desenvolvimento de estudos econômicos para avaliação preliminar do custo da integração desta tecnologia.
- Desenvolvimento de novos projetos de turbinas hidráulicas próprias para a operação em velocidade ajustável .

## Referências Bibliográficas:

- [1] ABOYTES, F., ANDERSON, T., BEGOVOC, M. “Advanced Angle Stability Controls”, *Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques a Haute Tension*, Paris, France, December, 1999.
- [2] ALENCAR, H.S., *Análise do Comportamento de Turbinas Hidráulicas para Operar com Rotação Variável*. Dissertação de M.Sc., EFEI, Itajubá, Brasil, 1999.
- [3] BARBI, I., *Teoria Fundamental do Motor de Indução*. Editora da UFSC, 1985
- [4] CALAINHO, J.A.L., HORTA, C.A., GONÇALVES, C., et al, “Cavitação em Turbinas Hidráulicas do Tipo Francis e Kaplan no Brasil”, *XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil, 17-22 de Outubro de 1999
- [5] CEMIG, *Projeto Definitivo – Usina de Nova Ponte, CEMIG, Belo Horizonte, Minas Gerais*, Brasil, julho de 1976.
- [6] CEMIG, *Projeto Executivo Relatório de integração Estudos Ambientais – Usina de Nova Ponte*, CEMIG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, setembro de 1995.
- [7] CONGRESSO NACIONAL, *Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art.21 da Constituição Federal, e altera art. 1º da Lei nº8001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7990, de 28 de dezembro de 1989. ,Lei nº 9433*, Brasília, Brasil, 1997
- [8] CONGRESSO NACIONAL, *Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas – ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. Lei nº 9984*, Brasília, Brasil, 2000.

- [9] DIGSILENT, *Dynamic Modeling of Doubly-Fed Induction Machine Wind-Generators*, DIGSILENT, Gomariningen, Alemanha, 2003.
- [10] FERREIRA, A.C., WATANABE, E.H., SOUZA, L.M., “Variable Speed Synchronous Condenser Using Doubly-Fed Induction Machine, *Revista Controle & Automação*, V.15 , n. 2, pp. 172-180, Abril, Maio e Junho de 2004.
- [11] HODDER, A., SIMOND, J.-J., SCHWERY, A., “Unbalanced DC-Link Voltage Regulation in a Back -to-Back 3-Level PWM Converter for a Doubly-Fed Induction Motor/Generator” . Disponível em <<http://lemewww.epfl.ch/ME/publications/2003/Article%20IEE.pdf>>. Acessado em 07 de julho de 2004.
- [12] HOFMANN,W., THIEME, A., “Control of a Double-Fed Induction Generator for Wind-Power Plants”, *Proceedings of Power Quality*, pp.275-282, May,1998.
- [13] KELBER, C.R., *Geração Hidrelétrica em Regime de Velocidade Ajustável Empregando Máquinas de Dupla Alimentação com Conversor Estático no Circuito Rotórico*. Dissertação de M.Sc., PUC/Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1997.
- [14] KOCH, F., SHEWAREGA, F.m ERLICH, I., “Alternative Models of the Doubly-Fed Induction Machine for Power System Dynamic Analysis”. *Internacional Conference on New and Renewable Energy Technologies for Sustainable Development*. 28 jun-01 julho de 2004, Evora, Portugal.
- [15] MELLO,F.P., *Dinâmica das Máquinas Elétricas I. Curso de Engenharia em Sistemas Elétricos de Potência Série P-T.I*. Santa Maria. RS. 1979
- [16] MELLO,F.P., KOESSLER, R.J., “Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies”, *Transactions on Power Systems*, V. 7, nº 1, February, 1992.

- [17] MELLO, L., SOUZA, L.M.O, “Análise da Cadeia Produtiva do Setor Petrolífero, brasileiro, em meio à Ética na Aplicação dos Excedentes Produtivos, a Responsabilidade Social e Ambiental e a Garantia da Qualidade de Vida” , *Revista Petro & Química*, pp 46-52, janeiro. 2005.
- [18] OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. Rio de Janeiro. LTC, 2000.
- [19] PASERBA, J.J., SHIMOMURA, M., TANAKA, S., et al, “Enhanced Generator Controls for the Improvement of Power System Voltage Stability”, *Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning (VIII SEPOPE)*, Brasilia, Brasil, 19-23 de maio de 2002.
- [20] POITIERS, F., MACHMOUM, M., Le Doeuff, R., et al, “Control of a Doubly-Fed Induction Generator for Wind Energy Conversion Systems”, Disponível em <[http://www.itee.uq.edu.au/~aupec/aupec01/026\\_%20POITIERS%20\\_AUPEC01%20paper%20revised.pdf](http://www.itee.uq.edu.au/~aupec/aupec01/026_%20POITIERS%20_AUPEC01%20paper%20revised.pdf)> . Acessado em 22 de Outubro de 2004.
- [21] PÖLLER, M.A., “Doubly-Fed Induction Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms”. Disponível em <[http://www.digsilent.de/Consulting/Publications/DFIG\\_Modeling.pdf](http://www.digsilent.de/Consulting/Publications/DFIG_Modeling.pdf)> Acessado em 20 de Maio de 2004.
- [22] RANGEL, R.D., *Modelagem de Equipamentos Facts Baseado em Inversores de Tensão para Análise de Fluxo de Potência e Fenômenos Eletromecânicos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
- [23] RANGEL, R.D., Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos- ANATEM – *Manual do Usuário – V09-12/01*, Relatório Técnico CEPTEL, DPP/PL 57/52002
- [24] REIS, L.B., SILVEIRA, S., GALVÃO, L.C.R., et al. *Energia Elétrica para o Desenvolvimento Sustentável*. 2 ed. São Paulo. Editora da Universidade de São Paulo, 2001.

- [25] REIS, L.B., *Usinas Hidrelétricas com Rotação Variável – Opção Energética para Longa Distância, Aproveitamentos de Pequeno Porte e Reversíveis*. Tese de Livre Docência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 1993
- [26] SAIDEL, M.A., REIS, L.B., “A Operação de Usinas Hidrelétricas em Rotação Ajustável: Perspectivas de Melhor Integração Ambiental do Aproveitamento”. *XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, FL/GPH/11, Belém, Pará, Brasil, 1997.
- [27] SAIDEL, M.A., *Rotação Ajustável em Usinas Hidroelétricas: Novas Premissas para o Planejamento Energético*. Tese de D.Sc., USP, São Paulo, SP, Brasil, 1995.
- [28] SAPIN, A., HODDER, A., SIMOND, J.-J., et al, “Doubly-Fed Asynchronous Machine with 3-Level VSI for Variable Speed Pump Storage”. Disponível em <[http://lemewww.epfl.ch/ME/publications/2000/varspeed\\_2000.pdf](http://lemewww.epfl.ch/ME/publications/2000/varspeed_2000.pdf)>. Acessado em 24 de Maio de 2004
- [29] SCHAFER, D., SIMOND, J.-J., “Adjustable Speed Asynchronous Machine in Hydro Power Plants and its Advantages for the Electric Grid Stability”, Disponível em <[www.powerengineering.com/pdf/Adjustable%20speed%20asynchr.pdf](http://www.powerengineering.com/pdf/Adjustable%20speed%20asynchr.pdf)>. Acessado em 24 de Maio de 2004
- [30] SCHAFER, D., SIMOND, J.-J., “Advantages for the Electric Grid Using a Doubly Fed Asynchronous Machine- Numerical Simulations”, Disponível em <<http://lemewww.epfl.ch/ME/publications/1997/hydro-power1997.pdf>> Acessado em 13 de Janeiro de 2005.
- [31] SIMOND, J.-J., SAPIN, A., SCHAFER, D., “Expected Benefits of Adjustable Speed Pumped Storage in the European Network”. Disponível em <[http://lemewww.epfl.ch/ME/publications/1999/varspeed\\_in\\_network\\_1999.pdf](http://lemewww.epfl.ch/ME/publications/1999/varspeed_in_network_1999.pdf)>. Acessado em 07 de Outubro de 2004.

- [32] SOUZA, Z., SANTOS, A.H.M., BORTONI, E.C., *Centrais Elétricas Estudos para Implantação*. Rio de Janeiro. Centrais Elétricas Brasileiras S.A - ELETROBRÁS, 1999.
- [33] SPORILD, R., GJERDE, J.O., GJENGEDAL, T., “Economic and Technical Aspects of Adjustable Speed Hydro(ASH) Machines Applied for Improved Stability in Power Networks”. Disponível em : <<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/iel5/6967/18766/00867379.pdf>>. Acessado em 12 de Julho de 2004.
- [34] SLOOTWEG, J.G., HAAN, S.W.H., POLINDER, H., et al, “Aggregated Modelling of Wind Parks with Variable Speed Wind Turbines in power System Dynamics Simulations”. *14th PSCC*, seção 06 trabalho 1, Sevilla, Spain, 24-28 june 2002.
- [35] TAKAHASHI, R., TAMURA, J., TADA, Y., et al, “Model Derivation of an Adjustable Speed Generator and Its Excitation Control System”. *14th PSCC*, seção 06 trabalho 4, Sevilla, Spain, 24-28 june 2002.
- [36] VARELLA, S., *Alterações em Turbinas Hidráulicas de Forma a Manter a Mesma Potência, Quando for Alterada a Rotação*. Dissertação de M.Sc., EFEI, Itajubá, Brasil, 1976.
- [37] VIANA, A.N.C., ALENCAR, H.S., “Análise Experimental de Turbinas Hidráulicas Operando com Rotação Variável”, *Grupo de Trabajo Sobre Hidromecánica 5ª Reunión*, Montevideo, Uruguay, 11-14 de mayo 1999.
- [38] XIA, Y., SHIMOMURA, M., PASERBA, J.J., “Active Power Control for Preventing Voltage Instability Using an Adjustable Speed Machine” Disponível em <[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/abs\\_free.jsp?arNumber=970169](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/abs_free.jsp?arNumber=970169)> . Acessado em 26 de Junho de 2004.