



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE REALIDADE VIRTUAL DESKTOP NA  
DINÂMICA DE OPERAÇÃO DE UMA UNIDADE HIDROGERADORA  
INTEGRADA EM UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA**

**ANDREY DA COSTA LOPES**

**DM 16/2007**

**UFPA/CT/PPGEE**  
**CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ**  
**BELÉM – PARÁ – BRASIL**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE REALIDADE VIRTUAL DESKTOP NA  
DINÂMICA DE OPERAÇÃO DE UMA UNIDADE HIDROGERADORA  
INTEGRADA EM UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA.

AUTOR: ANDREY DA COSTA LOPES

**UFPA/CT/PPGEE**  
**CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ**  
**BELÉM – PARÁ – BRASIL**

L864u Lopes, Andrey da Costa

Utilização de técnicas de realidade virtual desktop na dinâmica de operação de uma unidade hidrogeradora integrada em um sistema elétrico de potência / Andrey da Costa Lopes; orientador, Marcus Vinicius Alves Nunes .- 2007.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2007.

1. Usinas hidrelétricas - simulação por computador. 2. Realidade virtual. I. Título.

CDD – 21. ed. 621.312134

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE REALIDADE VIRTUAL DESKTOP NA  
DINÂMICA DE OPERAÇÃO DE UMA UNIDADE HIDROGERADORA  
INTEGRADA EM UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA.

AUTOR: ANDREY DA COSTA LOPES

APROVADA EM: 26/04/2007

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Marcus Vinícius Alves Nunes (UFPA)

**ORIENTADOR**

---

Prof. Dr. Manoel Ribeiro Filho (UFPA)

**CO-ORIENTADOR**

---

Prof. Dr. Ghendy Cardoso Junior (UFMS)

**MEMBRO DA BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Roberto Célio Limão (UFPA)

**MEMBRO DA BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. João Tavares Pinho (UFPA)

**MEMBRO DA BANCA EXAMINADORA**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ter iluminado meu caminho durante toda essa jornada do conhecimento.

Aos meus pais, por todo carinho, compreensão e educação que me foram dados, valores estes que contribuíram positivamente para a formação do meu caráter. E ainda pela oportunidade e estrutura que me foi concedida para que eu pudesse desenvolver os meus estudos.

À minha namorada, Adrianne Ribeiro, pela companhia, a qual teve participação marcante em minha vida, me incentivando e apoiando em todas as etapas de minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS, por me dar forças para progredir em cada passo da minha caminhada pelo saber.

À instituição UFPA, que me acolheu, como a muitos outros, desde a graduação, oferecendo um ensino público, gratuito e de qualidade.

Ao CORPO DOCENTE da instituição, pelo empenho em dividir seus conhecimentos, muito além da matéria dada em sala de aula. Com isto formando mais do que profissionais, cidadãos.

À ELETRONORTE, por acreditar e apoiar a realização deste trabalho.

À FUNPEA, por intermediar o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor MARCUS VINÍCIUS, pela sua dedicação e paciência em me orientar neste trabalho.

Ao professor MANOEL RIBEIRO, pelo aprendizado adquirido e pelas inúmeras e valiosas contribuições durante a realização deste trabalho.

Ao Grupo GSEI, pelo suporte dado através da infraestrutura e colegas de trabalho.

Ao Grupo do LRV, em especial ao PEBERTLI, por me ajudar na correção dos “bugs” inesperados no “software” presente.

E a todos os demais, que deixo de citar aqui, mas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, o meu MUITO OBRIGADO.

## EPÍGRAFE

“Embora os mestres e os livros sejam instrumentos necessários, é do esforço próprio que se consegue os mais completos e brilhantes resultados”.

Joelmir Betting

## RESUMO

A presente dissertação aborda os aspectos relacionados com o desenvolvimento de um sistema computacional voltado para o estudo do comportamento dinâmico do conjunto turbina-gerador em Usinas Hidrelétricas (UHE). São utilizadas metodologias 3D para a construção virtual das máquinas em operação. Técnicas de realidade virtual *desktop* são utilizadas como subsídio de visualização, análise e treinamento de usinas hidráulicas. Este sistema tem como objetivo auxiliar o processo de manutenção e operação de usinas. Todas essas análises visam a avaliar o comportamento dinâmico das turbinas de uma forma cognitiva, através de interfaces visuais avançadas, utilizando os recursos de realidade virtual. Para tanto, foi desenvolvido uma expansão da ferramenta computacional UGV (Unidade Geradora Virtual) na qual oferece um ambiente virtual de treinamento de manutenção e operação na UHE baseado em técnicas de RV Desktop. Nessa expansão, propõe-se um módulo chamado “Módulo de Operação”, o qual visa analisar o comportamento dinâmico da UHE, operando tanto em regime permanente, quanto em regime transitório.

PALAVRAS-CHAVES: USINAS HIDRELÉTRICAS, SIMULAÇÃO POR COMPUTADOR, REALIDADE VIRTUAL

## **ABSTRACT**

The current dissertation approaches the aspects related with the development of a computational system for the study of the dynamic behavior of the turbine-generator group in hydroelectric power plants. It will be used 3D methodologies for the virtual construction of machines in operation. Techniques of desktop virtual reality are used as subsidy of visualization, analysis and training for hydraulic plants. This system has as objective aids the maintenance and operation process of plants. All these analyses have as objective to evaluate the dynamic behavior of that in a cognitive way, through advanced visual interfaces, using the resources of virtual reality. Therefore an expansion of the VGU (Virtual Generating Unit) computational tool was developed in which offers a virtual environment of maintenance and operation training in hydroelectric power plants based on techniques of desktop virtual reality. In that expansion is presented a module called "Operation Module" which seeks to analyze the dynamic behavior of hydroelectric power plants operating so much in permanent regime as in transitory regime.

**KEYWORDS: HYDROPOWER PLANT, COMPUTER SIMULATION, VIRTUAL REALITY**

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b>	<b>IV</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>V</b>
<b>EPÍGRAFE</b>	<b>VI</b>
<b>RESUMO</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTAS DE FIGURAS</b>	<b>XII</b>
<b>LISTAS DE TABELAS</b>	<b>XVI</b>
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 CONTRIBUIÇÕES.....	3
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	4
<b>CAPÍTULO 2 – VISÃO GERAL SOBRE REALIDADE VIRTUAL</b>	<b>6</b>
2.1 INTRODUÇÃO À REALIDADE VIRTUAL.....	6
2.2 BREVE HISTÓRICO DA REALIDADE VIRTUAL .....	7
2.3 TIPOS DE SISTEMAS DE REALIDADE VIRTUAL .....	10
2.4 IMERSÃO, INTERAÇÃO E ENVOLVIMENTO .....	13
2.5 FORMAS DE INTERAÇÃO EM AMBIENTES VIRTUAIS.....	14
2.6 FORMAS DE ENVOLVIMENTO EM AMBIENTES .....	15
2.7 APLICAÇÕES DA REALIDADE VIRTUAL .....	16
2.7.1 APLICAÇÕES MÉDICAS E EM SAÚDE.....	16
2.7.2 APLICAÇÕES EM EDUCAÇÃO.....	18
2.7.3 APLICAÇÕES EM ARQUITETURA E PROJETO .....	20

2.7.4	APLICAÇÕES PARA TREINAMENTO E VISUALIZAÇÃO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.....	21
<b>2.8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>25</b>

### **CAPÍTULO 3 – A USINA HIDROELÉTRICA DE TUCURUÍ** **26**

<b>3.1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2</b>	<b>PRINCIPAIS PARTES DE UMA CENTRAL HIDRELÉTRICA.....</b>	<b>26</b>
3.2.1	BARRAGEM.....	28
3.2.2	CAPTAÇÃO E CONDUTO FORÇADO.....	29
3.2.3	CASA DE MÁQUINAS.....	30
3.2.4	RESTITUIÇÃO DE ÁGUA.....	31
<b>3.3</b>	<b>TURBINAS HIDRÁULICAS.....</b>	<b>31</b>
3.3.1	DEFINIÇÃO.....	31
3.3.2	TIPOS DE TURBINAS HIDRÁULICAS.....	32
<b>3.4</b>	<b>A USINA HIDROELÉTRICA DE TUCURUÍ.....</b>	<b>35</b>
3.4.1	TURBINA FRANCIS DA USINA HIDRELÉTRICA DE TUCURUÍ.....	37
<b>3.5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>46</b>

### **CAPÍTULO 4 – MODELAGEM UTILIZADA NA DINÂMICA DA UHE E ALGUNS ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO SISTEMA DE REGULAÇÃO** **47**

<b>4.1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>47</b>
<b>4.2</b>	<b>GERADORES ELÉTRICOS.....</b>	<b>48</b>
4.2.1	MODELO DINÂMICO DO GERADOR SÍNCRONO.....	50
4.2.2	CONTROLE DE TENSÃO DO GERADOR.....	52
4.2.3	MODELO DINÂMICO DO REGULADOR DE TENSÃO E ESP.....	52
<b>4.3</b>	<b>CONTROLE DE VELOCIDADE DA TURBINA HIDRÁULICA.....</b>	<b>53</b>
4.3.1	DESCRIPTIVO FUNCIONAL DE REGULAÇÃO – SISTEMA MECÂNICO-HIDRÁULICO.....	54
4.3.2	COMANDO DAS PALHETAS DISTRIBUIDORAS.....	56
4.3.3	MODELO DINÂMICO DO REGULADOR DE VELOCIDADE.....	58
<b>4.4</b>	<b>MODELAGEM DAS ARTICULAÇÕES DO SISTEMA DISTRIBUIDOR DA TURBINA.....</b>	<b>59</b>
<b>4.5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>64</b>

### **CAPÍTULO 5 – ESTRUTURA COMPUTACIONAL DA UHE VIRTUAL** **65**

5.1	INTRODUÇÃO .....	65
5.2	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.....	65
5.3	MODELAGEM 3D.....	66
5.4	ARQUITETURA DO SISTEMA.....	67
5.5	O USO DE TÉCNICA DE MODELAGEM ORIENTADA A OBJETOS COMO FERRAMENTA DE DESENVOLVIMENTO .....	69
5.6	INTERFACE .....	74
5.7	COMANDOS DA BARRA DE MENUS .....	76
5.8	MÓDULOS.....	78
5.9	MÓDULO DE OPERAÇÃO .....	81
	5.9.1 FUNCIONALIDADES DO MÓDULO DE OPERAÇÃO .....	85
5.10	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	92
<b><u>CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</u></b>		<b>93</b>
6.1	CONCLUSÕES.....	93
6.2	TRABALHOS FUTUROS.....	94
<b><u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u></b>		<b>95</b>

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 2.1 – Foto promocional de um protótipo do Sensorama (PIMENTEL, 1995). .....	7
Figura 2.2 – Ultimate Display - Ivan Shuterland, 1970. ....	8
Figura 2.3 – A luva de dados DataGlove desenvolvida pela VPL com sensores de fibra ótica. ....	10
Figura 2.4 – Sistema de realidade virtual imersivo.....	11
Figura 2.5 – Sistema de realidade virtual não-imersivo.....	11
Figura 2.6 – Conceituando Realidade Virtual.....	13
Figura 2.7 – Visualização em tempo real de uma biópsia em uma mama. ....	17
Figura 2.8 – Sobreposição de imagens ao mundo real para assistência durante um procedimento cirúrgico (MACHADO, 2003). ....	17
Figura 2.9 – Aplicação em realidade aumentada para área médica (STATE et al., 1996).....	18
Figura 2.10 – Imagem de um treinamento em prática de sutura sendo executado em um simulador (HALUCK et al., 1998).....	18
Figura 2.11 – Ambiente Virtual de Projeto Science Space (DEDE et al., 1996)...	19
Figura 2.12 – Um dos modelos de sala virtual do Projeto Professor Virtual (DIZERÓ, 1998).....	20
Figura 2.13 – Interface do programa com a visualização 3D de um projeto arquitetônico. ....	21
Figura 2.14 – Vista do mapa tridimensional de São Carlos (SP) que mostra a topografia da cidade. ....	22
Figura 2.15 – Vista da subestação Paraíso.....	22
Figura 2.16 – Modelos 3D de postes.....	22
Figura 2.17 - Interface do módulo de operação, destacando o botão oscilografias. .....	23
Figura 2.18 - Interface de gráficos.....	23
Figura 2.19 – Visão da Nacele (Nunes et al., 2006).....	24
Figura 3.1 – Unidade Hidroelétrica de Energia.....	28
Figura 3.2 – Turbina Pelton, de dois (02) jatos e eixo horizontal.....	33

Figura 3.3 – Partes principais da turbina Francis. ....	34
Figura 3.4 – Turbina Kaplan: Central Hidrelétrica de Machicura, Chile; (duas) máquinas de 36,7 m; 144,2 m <sup>3</sup> /s e 48,4 MW. ....	35
Figura 3.5 – Arranjo geral da UHE de Tucuruí – primeira etapa. ....	36
Figura 3.6 – Desenho esquemático de funcionamento de uma turbina Francis de eixo vertical. ....	37
Figura 3.7 – Vistas externas da caixa espiral. ....	38
Figura 3.8 – Vista interna da caixa espiral ....	38
Figura 3.9 – Estrutura física do distribuidor ....	39
Figura 3.10 – Pré-Distribuidor. ....	40
Figura 3.11 – Tampa Superior. ....	41
Figura 3.12 – Tampa inferior ....	41
Figura 3.13 – Cone suporte do mancal de escora. ....	42
Figura 3.14 – Servomotor. ....	42
Figura 3.15 – Palhetas diretrizes. ....	43
Figura 3.16 – Anel de regulação ....	43
Figura 3.17 – Rotor da Turbina Francis. ....	44
Figura 3.18 – Eixo da Turbina. ....	45
Figura 3.19 – Estrutura do tubo de sucção. ....	46
Figura 3.20 – Virolas do tubo de sucção. ....	46
Figura 4.1 – Topologia da rede. ....	47
Figura 4.2 – Estrutura física do gerador síncrono. ....	49
Figura 4.3 – Diagrama esquemático do modelo transitório do gerador síncrono, conectado a uma rede de transmissão. ....	51
Figura 4.4 – Modelo do sistema de excitação ST1A. ....	53
Figura 4.5 – Modelo do Estabilizador do Sistema de Potência ....	53
Figura 4.6 – Esquema de abertura e fechamento do distribuidor: (a) totalmente fechado, (b) totalmente aberto. ....	55
Figura 4.7 – Sistema mecânico hidráulico do Regulador de Velocidade da Turbina. ....	56
Figura 4.8 – Esquema hidráulico de comando do distribuidor. ....	57
Figura 4.9 – Modelo do regulador de velocidade. ....	58
Figura 4.10 – Modelo da turbina hidráulica. ....	58

Figura 4.11 – Navegação mostrando os 6 graus de liberdade possíveis. ....	60
Figura 4.12 – Lugar geométrico para o movimento das peças articuladas do distribuidor. ....	60
Figura 4.13 – Ângulo de rotação para cada peça articulada do distribuidor.....	63
Figura 5.1 – Árvore de peças da UHG .....	67
Figura 5.2 – Diagrama com as principais funcionalidades internas do sistema. ...	67
Figura 5.3 – Representação de uma classe em UML .....	71
Figura 5.4 – Notação UML para os tipos de relacionamento. ....	72
Figura 5.5 – Diagrama de classes para o simulador dinâmico da UHE, desenvolvido na presente dissertação de mestrado.....	73
Figura 5.6 – Interface inicial do Sistema, destacando suas principais características.....	75
Figura 5.7 – Barra de menus da aplicação.....	76
Figura 5.8 – Menu Módulos.....	77
Figura 5.9 – Menu Visões.....	77
Figura 5.10 – Janela da Árvore de Peças, mostrando agrupamentos e peças. ...	78
Figura 5.11 – Vista superior enquanto a animação da montagem das peças ocorre.....	79
Figura 5.12 – Vista lateral do final do processo de montagem.....	79
Figura 5.13 – Entrada do cone local onde se pode visualizar o funcionamento interno da máquina. ....	79
Figura 5.14 – Entrada do tubo de onde se tem a altura da UGV e se vê a tomada de água.....	79
Figura 5.15 – Porta eclusa da caixa espiral, passagem por onde se entra para realizar diversas manutenções. ....	79
Figura 5.16 – Interior da caixa espiral de onde se tem uma visão do funcionamento do rotor e do sistema distribuidor. ....	79
Figura 5.17 – Visão do observador no início da manutenção. ....	80
Figura 5.18 – Visão da porta da caixa espiral por onde será realizado o procedimento de manutenção. ....	80
Figura 5.19 – Visão do interior da caixa espiral direcionando-se para o ponto de manutenção.....	80

Figura 5.20 – Animação da manutenção da junta entre o pré-distribuidor e a tampa superior.....	80
Figura 5.21 – Módulo Operação: Contingências.....	81
Figura 5.22 – Interface inicial para o módulo “Operação”.....	81
Figura 5.23 – Interface “Gráficos”.....	83
Figura 5.24 – Módulo “Operação”: “Ensaio do Distribuidor”.....	84
Figura 5.25 – Interface “Ensaio do Distribuidor”.....	85
Figura 5.26 – Tela inicial do sub-módulo “Contingências”.....	86
Figura 5.27 – Sub-módulo “contingência” após pressionar o botão Girar.....	86
Figura 5.28 – Visão do distribuidor ao se aproximar com as teclas direcionais. ...	86
Figura 5.29 – Peças móveis animadas durante a simulação.....	86
Figura 5.30 – Tela inicial da interface “Gráficos”.....	87
Figura 5.31 – Tensão terminal, para um curto-circuito.....	88
Figura 5.32 – Freqüência do gerador, para um curto-circuito.....	88
Figura 5.33 – Potência Reativa do gerador, para um curto-circuito.....	88
Figura 5.34 – Ambiente virtual da contingência.....	88
Figura 5.35 – Ajuste dos parâmetros para simulação de variação de carga.....	89
Figura 5.36 – Ângulo de carga, para variação de carga.....	89
Figura 5.37 – Freqüência do gerador, para uma variação de carga.....	89
Figura 5.38 – Abertura do distribuidor, para uma variação de carga.....	89
Figura 5.39 – Potência reativa do gerador para uma variação de carga.....	90
Figura 5.40 – Tela inicial da interface “Ensaio do distribuidor”.....	91
Figura 5.41 – Abertura do distribuidor.....	92
Figura 5.42 – Válvula distribuidora.....	92
Figura 5.43 – Distribuidor totalmente fechado.....	92
Figura 5.44 – Distribuidor com 30% de abertura.....	92

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dados técnicos das UHG, para 1ª e 2ª Etapa. ....	36
Tabela 3.2 – Velocidades de rotação da turbina .....	37
Tabela 4.1 – Parâmetros da turbina e regulador de velocidade.....	59

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

### 1.1 Motivação

Um dos maiores desafios no que diz respeito às plantas industriais de grande porte, bastante complexas e que não podem ser paralisadas, devido aos prejuízos financeiros, materiais ou de segurança das pessoas envolvidas, é a realização de treinamento do pessoal de manutenção e operação. Usinas termo-nucleares, instalações metalúrgicas ou usinas hidroelétricas possuem um alto nível de complexidade para os quais os treinamentos convencionais, baseados em material impresso e documentações, não são suficientes para cobrir toda a complexidade do funcionamento de tais plantas e suas máquinas, deixando por trás uma lacuna cognitiva entre a teoria e a aplicação prática do treinamento (BLUEMEL *et al*, 2003).

Por outro lado, a abordagem de treinamento utilizando Realidade Virtual (RV) proporciona aos aprendizes a manipulação visual das partes envolvidas no processo (SÁ & ZACHMANN, 1999), permitindo além disso, aos novos funcionários e pessoas recentemente empregadas (engenheiros e técnicos), os quais não tenham participado da montagem das instalações físicas, e que estejam autorizados a familiarizar-se e estudar as partes ocultas pela estrutura física da construção (BOUD *et al*, 1999), possuindo ainda outras vantagens como fazer com que o aprendiz sinta-se como se estivesse em uma instalação real, dispondo de modelos semelhantes ao das máquinas no mesmo local onde são usadas no treinamento.

A RV é uma tecnologia freqüentemente considerada como uma extensão natural da computação gráfica 3D com avançados dispositivos de entrada e saída. Atualmente, a RV tem amadurecido o suficiente para garantir importantes aplicações em engenharia.

Diante desse contexto, é cada vez maior o interesse de indústrias em sistemas de treinamento usando RV. Esta pode ser definida como um ambiente tridimensional gerado por computador, atualizado em tempo real, que permite a interação humana através de vários dispositivos de entrada e saída. Como permite uma variedade de representações, 2D ou 3D, desktop ou imersiva, oferece aos usuários a oportunidade de explorar objetos virtuais no nível de detalhe necessário a cada atividade (BURDEA, 2003).

Trabalhos desenvolvidos na mesma linha, abordam a aplicação prática de procedimentos de montagem e manutenção, em Unidades Hidrelétricas de Energia (UHE).

Em JIANG GUO *et al.*, (2002) utilizou-se um sistema de realidade virtual casado com os sistemas próprios de uma unidade geradora, permitindo que se possa trocar a manutenção baseada em tempo (TBM) por uma manutenção baseada em condições (CBM), o que reduz o tempo de manutenção, além de ser mais econômica. Isto pela possibilidade de analisar e diagnosticar o comportamento do sistema visualmente e pelo conhecimento do funcionamento interno adquirido.

Em JIANG GUO *et al.*, (2003), o mesmo autor destaca as vantagens obtidas na visualização de uma UHE através de uma arquitetura de RV. O autor cita, além das vantagens descritas anteriormente, que um sistema RV proporciona acompanhar as interações internas entre as máquinas sob várias condições diferentes e ainda mais, permite a observação de condições cuja visualização seria impossível no mundo real, ampliando assim as condições de aprendizado.

Além destes, podem-se citar outros autores que estudaram o potencial de uso da RV sobre o processo de geração de energia hidrelétrica, como em PAMPLONA JUNIOR *et al.*, (2006a) e PAMPLONA JUNIOR *et al.*, (2006b). Neles se aplica um estudo de caso sobre uma planta virtual de uma UHE, voltada para o treinamento em manutenção.

Além dos estudos de manutenção, aplicados à UHE, tem-se desenvolvido também, estudos quanto à operação, com aplicações dos recursos de RV, voltados para educação e treinamento, conforme LOPES *et al.*, (2006) e LOPES *et al.*, (2007).

Com base no exposto acima, muito se tem a explorar no estudo da UHE agregada às potencialidades da realidade virtual.

Buscando explorar essa linha de estudo, uma ferramenta computacional chamada UGV (Unidade Geradora Virtual) vem sendo desenvolvida, como protótipo de um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da UFPA com a ELETRONORTE, na qual oferece um ambiente virtual de treinamento de manutenção e operação na UHE baseado em técnicas de RV Desktop, onde maiores detalhes poderão ser encontrados nos seguintes trabalhos (DOS REIS, 2006; LOPES *et al.*, 2006; LOPES *et al.*, 2007; PAMPLONA JUNIOR *et al.*, 2006a; PAMPLONA JUNIOR *et al.*, 2006b).

A UGV apresenta três módulos principais, o primeiro módulo, educativo, que tem como objetivo a visualização e estudo geral das seções constituintes de uma UHE. O segundo módulo, manutenção, que oferece treinamento de diferentes montagens e manutenção de peças da UHE, baseado na aprendizagem “*learning by doing*”, e o terceiro, módulo operação, que oferece treinamento de operação de uma UHE, tais como partida e parada de uma UHE.

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho propõe um ambiente educacional de um sistema baseado em técnicas de Realidade Virtual Desktop para treinamento na indústria de geração de energia elétrica, especificamente de uma Unidade Hidrelétrica de Energia (UHE), sendo este uma expansão da ferramenta UGV no qual propõe um módulo chamado “Módulo de Operação”.

Como objetivos específicos propõem-se:

- Desenvolvimento de metodologias de modelagem 3D para a construção virtual de máquinas em operação, como subsídio de análise destas;
- Desenvolvimento de uma interface para estudo e análise de usinas hidrelétricas, abordando os aspectos ou operação destas.

Todas estas análises visam avaliar o comportamento dinâmico dos hidrogeradores de uma forma cognitiva, através de interfaces visuais avançadas, utilizando os recursos de RV.

O sistema utiliza modelos CAD das peças constituintes (COURSEUIL 2004), organizados em um grafo de cena hierárquico (ZHENG-PING 2003) e tem como base de dados documentos no formato XML, “*eXtensible Markup Language*” (W3C 1998).

## 1.3 Contribuições

Uma das contribuições deste trabalho é apresentar uma aplicação, utilizando técnicas de realidade virtual desktop de baixo custo, baseada em computador pessoal, as quais permitem ao usuário conhecer os elementos básicos de uma UHE em termos de aparência, comportamento, funcionalidades e operação.

Este trabalho também tem como objetivo contribuir para o uso de modelagem orientada a objeto para o desenvolvimento dos modelos dinâmicos utilizados na animação e interação da UHE presente no ambiente virtual.

Estabelecimento de um relacionamento entre os modelos dinâmicos da operação de uma UHE com o ambiente de RV, através da visualização do processo mecânico do distribuidor desta.

Outra contribuição é a modernização dos métodos de treinamentos de equipes de manutenção e operação em usinas hidrelétricas, através do desenvolvimento de modelos adequados à representação destas em ambientes virtuais, conforme a análise que se deseja fazer.

#### **1.4 Estrutura do Trabalho**

Além deste capítulo introdutório, o presente trabalho consiste de mais cinco capítulos:

- Capítulo 2 – Apresenta um estudo sobre realidade virtual, envolvendo conceitos e características relevantes para justificar a utilização desta tecnologia na área de educação e treinamento. São apresentados exemplos que justificam a utilização da proposta deste trabalho em ambientes virtuais.
- Capítulo 3 – Apresenta as características de uma unidade hidrelétrica de energia. Descreve suas partes fundamentais, tipo de turbinas hidráulicas, enfatizando a turbina que será utilizada no estudo de caso deste trabalho e finalizando com uma visão geral da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, objeto do estudo de caso.
- Capítulo 4 – Aborda a modelagem dinâmica da UHE, utilizada na simulação das partes eletromecânicas da usina, para fins de animação gráfica do distribuidor da turbina.

- Capítulo 5 – Descreve a implementação computacional com o detalhamento do sistema, protótipo de interface gráfica do simulador virtual turbina-gerador, e das ferramentas facilitadoras para a implementação computacional.
- Capítulo 6 – As conclusões obtidas a partir da realização desta dissertação são apresentadas, expondo-se as principais contribuições que este poderá fornecer à área de realidade virtual.

## CAPÍTULO 2 – VISÃO GERAL SOBRE REALIDADE VIRTUAL

### 2.1 Introdução à Realidade Virtual

A Realidade Virtual torna-se cada vez mais presente em sistemas computacionais e apresenta vantagens quando utilizada para simular situações reais em diferentes áreas do conhecimento (HAASE *et al.*, 1996; HODGES *et al.*, 1995; MACHADO, 1997; VINCE, 1995).

Estabelecer o conceito de Realidade Virtual não é uma tarefa simples, pois existem inúmeras definições, assim como encontram-se também diversos sinônimos para esta na literatura, como: Ambientes Sintéticos, Ciber-Espaço, Realidade Artificial, entre outros.

O termo Realidade Virtual foi cunhado da década de 1980 por Jaron Lanier (BIOCCA & LEVY, 1995), artista e cientista da computação, que conseguiu fazer convergir dois conceitos antagônicos em um novo e vibrante conceito, capaz de captar a essência dessa tecnologia: a fusão do real com o virtual.

Realidade Virtual pode ser definida como uma interface mais natural e poderosa da interação homem-máquina, por permitir ao usuário interação, navegação e imersão em um ambiente tridimensional sintético, gerado por computador, através de canais multisensoriais, tais como visão, audição e tato (BURDEA & COIFFET, 1994, KIRNER, 1998; DIZERÓ, 1999; MEIGUINS, 1999). A grande vantagem desse tipo de interface é que o conhecimento intuitivo do usuário a respeito do mundo físico pode ser utilizado para manipular o mundo virtual.

Segundo HANCOCK (1995), a realidade virtual é, antes de tudo, uma interface avançada para o usuário acessar aplicações executadas no computador. Considerando-se os aspectos visuais, as interfaces podem ser classificadas em três gerações: interfaces textuais; interfaces gráficas e interfaces gráficas tridimensionais, que permitem aos usuários entrar em espaços tridimensionais modelados e executar ações, usando uma variedade de dispositivos especiais (KIRNER & TORI, 2004).

Uma definição um pouco mais refinada de realidade virtual é a seguinte: “realidade virtual é uma forma das pessoas visualizarem, manipularem e interagirem

com computadores e dados extremamente complexos” (AUKSTAKALNIS & BLATNER, 1992). Kirner reuniu algumas definições de realidade virtual (BURDEA & COIFFET, 1994; JACOBSON, 1991; KRUEGER, 1991) da seguinte forma: “realidade virtual é uma técnica avançada de interface, onde o usuário pode realizar imersão, navegação e interação em um ambiente sintético tridimensional gerado por computador, utilizando canais multi-sensoriais”.

## 2.2 Breve Histórico da Realidade Virtual

A Realidade Virtual começou com a indústria de simulação, com os simuladores de vôo que a Força Aérea dos Estados Unidos passou a construir, logo após a Segunda Guerra Mundial (JACOBSON, 1994). A indústria de entretenimento também teve um papel importante no surgimento da Realidade Virtual através de um simulador chamado Sensorama, desenvolvido por Morton Heiling em 1956. Este simulador combinava filmes 3D, vibrações mecânicas, som estéreo, aromas e ar movimentado por ventiladores; tudo isso para que o espectador tivesse uma viagem multisensorial (PIMENTEL & TEIXEIRA, 1995). Embora o invento não tenha alcançado sucesso comercial, ele foi o precursor da imersão do usuário em um ambiente sintético.

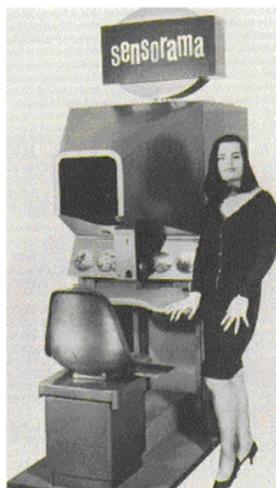


Figura 2.1 – Foto promocional de um protótipo do Sensorama (PIMENTEL, 1995).

Em 1961, Comeau e Bryan descreveram o primeiro sistema de circuito fechado de televisão com o visor montado em um capacete, produzido pela Philco

Corporation. O sistema tinha um rastreador de posição no capacete e permitia ao usuário controlar remotamente uma câmera de televisão a partir dos seus movimentos da cabeça (KALAWSKY, 1993).

Alguns anos depois, por volta de 1965, Ivan Sutherland apresentou à comunidade científica a idéia de usar computadores para desenhar projetos diretamente na tela do computador, através do uso de uma caneta ótica. Este foi o início dos gráficos computadorizados (computação gráfica). Sutherland tornou-se o precursor da atual indústria de CAD e desenvolveu o primeiro videocapacete totalmente funcional para gráficos de computador no projeto “The Ultimate Display”. Com o uso desse videocapacete foi possível ao usuário ver, através da movimentação de sua cabeça, os diferentes lados de uma estrutura de arame na forma de um cubo flutuando no espaço (PIMENTEL & TEIXEIRA, 1995).

Em 1968, na Universidade de Harvard, Ivan Shuterland construiu o primeiro capacete de visualização com imagens geradas por computador, incorporando um sistema de rastreamento da posição da cabeça, conforme apresenta a Figura 2.2. Esse trabalho é considerado por muitos como o marco inicial da imersão em ambiente virtual e início da RV (KRUEGER, 1991; WATKINS & MARENKA, 1994). O primeiro HMD “*Head Mounted Display*” disponibilizado comercialmente foi o “*EyePhone*” pela VPL Research em 1989.



Figura 2.2 – Ultimate Display - Ivan Shuterland, 1970.

Na mesma época em que Sutherland criava na Universidade de Utah seu videocapacete, Myron Krueger experimentava combinar computadores e sistemas de vídeo, criando Realidade Artificial na Universidade de Wisconsin (PIMENTEL & TEIXEIRA, 1995). Em 1975 Krueger criou o VIDEOPLACE, onde uma câmera de vídeo capturava a imagem dos participantes e projetava-a em 2D numa grande tela. Os participantes podiam interagir uns com os outros e com objetos projetados nessa tela, sendo que seus movimentos eram constantemente capturados e processados. Essa técnica tornou-se também conhecida como Realidade Virtual de Projeção (JACOBSON, 1994).

A indústria aeroespacial experimentava ao mesmo tempo a Realidade Virtual aumentada. A idéia era ajudar os mecânicos em trabalhos de montagens. Eles podiam ver o interior das máquinas, onde o computador realçava certas áreas de interesse. Esta técnica continua sendo adotada para ajudar no reparo de máquinas.

Em 1982, Thomas Furness demonstrou para a Força Aérea Americana o VCASS “*Visually Coupled Airborne Systems Simulator*”, conhecido como “*Super Cockpit*” - um simulador que imitava a cabine de um avião através do uso de computadores e videocapacetes interligados, representando um espaço gráfico 3D (PIMENTEL & TEIXEIRA, 1995). Os videocapacetes integravam a parte de áudio e vídeo. Assim, os pilotos podiam aprender a voar e lutar em trajetórias com 6 graus de liberdade (6DOF) sem decolar verdadeiramente, ficando praticamente isolados do mundo ao seu redor. O VCASS possuía uma alta qualidade de resolução nas imagens e era bastante rápido no processo de renderização de imagens complexas. No entanto, apresentava um problema: milhões de dólares eram necessários apenas para o capacete (PIMENTEL & TEIXEIRA, 1995).

Através do uso de uma nova tecnologia de visores de cristal líquido (LCD) Michael McGreevy começou a trabalhar no projeto VIVED “*Virtual Visual Environment Display*” em 1984 na NASA, no qual as imagens seriam estereoscópicas (PIMENTEL & TEIXEIRA, 1995). A resolução das imagens era limitada em comparação ao VCASS, mas o custo era bastante atrativo (RHEINGOLD, 1991). A parte de áudio e vídeo foi então montada sobre uma máscara de mergulho utilizando dois visores de cristal líquido com pequenos auto-falantes acoplados. Scott Fisher juntou-se a esse projeto no ano de 1985 com o objetivo de incluir nele: luvas de dados, reconhecimento de voz, síntese de som 3D, e dispositivos de realimentação tátil (PIMENTEL & TEIXEIRA, 1995).

Em 1977 e 1982 apareceram também as primeiras luvas para a interação com aplicativos de RV. Elas foram desenvolvidas respectivamente pelo grupo liderado por Dan Sandin, Richard Soyre e Thomas Defanti, na Universidade de Illinois e por Thomas Zimmerman, sendo projetadas para serem acopladas diretamente aos computadores. Em 1987, a empresa VPL Research Inc, da qual Zimmerman foi um dos fundadores, colocou pela primeira vez produtos de RV no mercado, com a comercialização da luva “*Data Glove*”, ilustrada na Figura 2.3. Em seguida, a empresa também passou a vender um capacete de visualização chamado “*Eye Phones*” (KRUEGER, 1991; WATKINS & MARENKA, 1994).

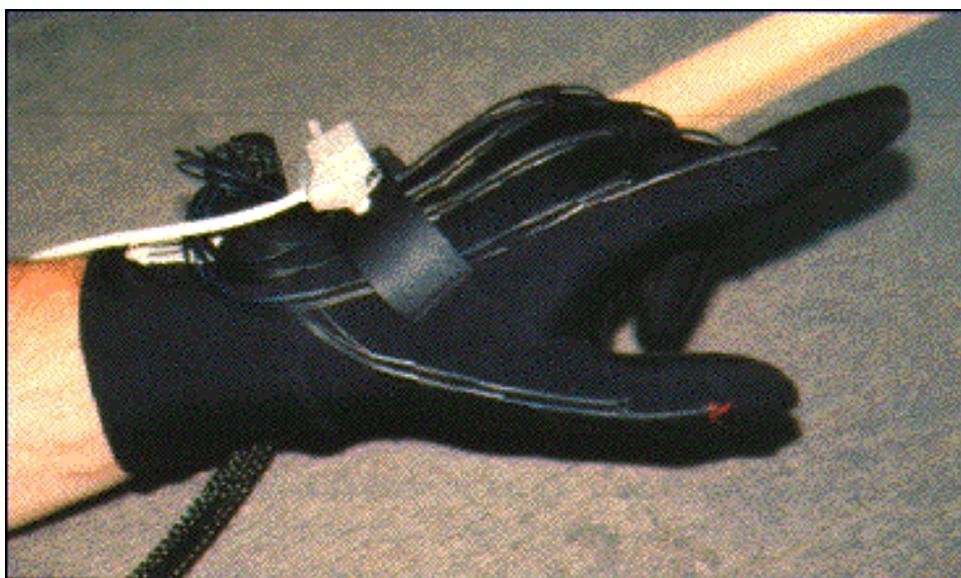


Figura 2.3 – A luva de dados DataGlove desenvolvida pela VPL com sensores de fibra ótica.

Em 1989 a AutoDesk apresentou o primeiro sistema de Realidade Virtual baseado em um computador pessoal (PC) (JACOBSON, 1994).

A partir daí, o grande interesse comercial por tecnologias de RV, devido à enorme demanda por aplicações nas mais diversas áreas, provocou crescimento significativo na oferta de componentes e produtos de RV, com conseqüente redução nos preços desses produtos (DIZERÓ, 1999), levando à popularização da Realidade Virtual.

### **2.3 Tipos de Sistemas de Realidade Virtual**

Os Sistemas de Realidade Virtual (SRV) têm por objetivo propiciar um ambiente que simule um espaço do mundo real ou de um mundo imaginário, no qual

o usuário possa se sentir inserido (MACHADO 1995). Nos últimos dez anos, ocorreram grandes avanços tanto na área de modelagem de mundos virtuais, quanto na tecnologia voltada para o sentimento de imersão total do usuário através da utilização de seus cinco sentidos (KIRNER 1999).

Os SRV diferem entre si de acordo com os níveis de imersão e de interatividade proporcionados ao participante. Esses níveis são determinados pelos tipos de dispositivos de entrada e saída de dados do sistema, além da velocidade e potência do computador que o hospeda, não existindo um critério claro de classificação dos sistemas de RV (NETTO *et al.*, 2002).

A imersão é considerada como o principal aspecto de um SRV. Do ponto de vista da visualização, um SRV **imersivo** é baseado no uso de capacete ou de salas de projeção nas paredes, como na Figura 2.4; por outro lado, um SRV **não-imersivo** baseia-se no uso de monitores de vídeo, disponíveis na maioria dos visualizadores de aplicações de RV, Figura 2.5 (MEIGUINS, 2002).



Figura 2.4 – Sistema de realidade virtual imersivo

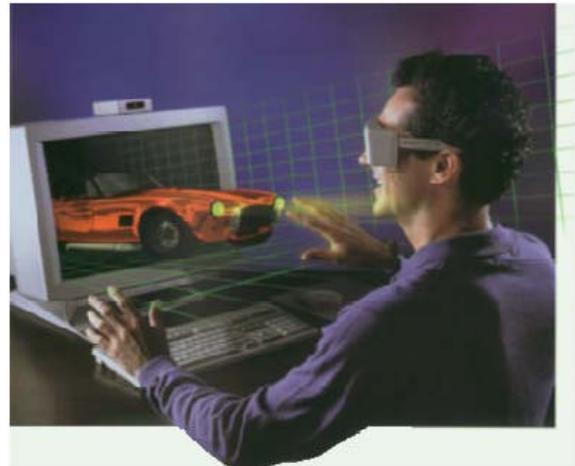


Figura 2.5 – Sistema de realidade virtual não-imersivo.

Levando-se em consideração os ambientes que apresentam características para SRV e *interfaces* não convencionais, podem-se classificar os sistemas em (PINHO, 1998, PIMENTEL & TEIXEIRA, 1995; KIRNER, 1998):

- **Sistemas de Realidade Virtual:** O usuário participa de um mundo virtual gerado no computador, usando dispositivos sensoriais de percepção e

controle. Um ambiente virtual pode ser projetado para simular tanto um ambiente imaginário, quanto um ambiente real.

- **Telepresença:** Faz uso de câmeras de vídeo e microfones remotos para imergir o usuário em um lugar diferente, utilizando-se para isso uma *interface* homem-máquina, um telerobô e um ambiente remoto. Controle de robôs para explorações planetárias são os exemplos mais imediatos de aplicação desta tecnologia, mas há, também, um enorme potencial para seu uso em medicina. Em procedimentos cirúrgicos, médicos já usam câmeras de vídeo e cabos de fibra óptica para examinarem órgãos internos dos pacientes. Com RV, eles poderiam ir para o “lado de dentro” do paciente para direcionar seu trabalho ou acompanhar o trabalho de outros médicos.
- **Cabine de Simulação:** Simuladores para pilotos de avião são os exemplos mais familiares de simulação baseada em cabines. O usuário toma assento dentro de uma cabine projetada em detalhes para lembrar o interior de um avião, onde, à sua frente, há uma janela virtual implementada por uma tela de computador, que apresenta imagens de alta resolução. Em alguns casos, a cabine pode se movimentar de acordo com as ações do usuário, desde que a mesma seja montada em uma plataforma móvel.
- **Realidade Projetada:** São usadas salas para projetar vídeos, cujo tamanho das telas de projeção corresponde ao tamanho de cada parede da sala. Assim, os usuários têm a sensação de que estão totalmente imersos em um mundo virtual, em vez de ver o mundo da tela de um computador.
- **Realidade Aumentada:** Corresponde a uma combinação de visão do ambiente real com o ambiente virtual. O ponto crítico desse tipo de sistema é a superposição exata do mundo virtual com o mundo real. A realidade aumentada utiliza dispositivos especiais para a visualização, como óculos e capacetes, semi-transparentes, que podem projetar dados, diagramas, animações e gráficos 3D. Essas aplicações visam ajudar pessoas que necessitam simultaneamente estar no mundo real e também estar habilitada a acessar informações adicionais para executar seu trabalho.

- **Realidade Melhorada:** É uma variação do sistema de realidade aumentada, onde um sistema de processamento de imagem gera informações adicionais para serem sobrepostas à imagem real. O resultado final pode ser tanto uma melhoria espectral, quanto espacial, gerando transformações e anotações sobre a imagem.
- **Desktop RV:** É um subconjunto dos SRV tradicionais. Ao invés de dispositivos de visualização não convencionais, como capacetes e óculos, um monitor de computador ou sistema de projeção é usado para apresentar o mundo virtual. Esta é uma escolha bastante popular, devido às dificuldades financeiras em se adquirir periféricos não convencionais para RV, por parte da maioria dos usuários comuns.

## 2.4 Imersão, Interação e Envolvimento

A Realidade Virtual pode ser caracterizada como sendo a junção de três idéias básicas: imersão, interação e envolvimento, como mostra a Figura 2.6 (KIRNER, 1998).

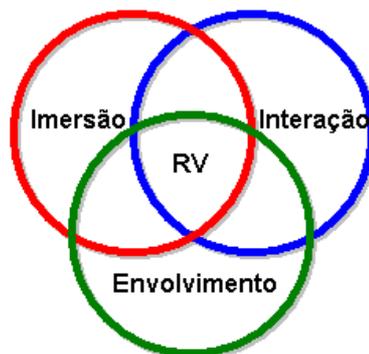


Figura 2.6 – Conceituando Realidade Virtual.

- **Imersão** – Está relacionada ao sentimento de se estar dentro do ambiente. Normalmente, um sistema imersivo é obtido com o uso de capacete de visualização, ou cavernas; sistemas imersivos baseados em salas com projeções das visões nas paredes, teto, e piso (CRUZ-NEIRA, 1992).

- **Interação ou Manipulação** – Está ligada à capacidade do computador detectar as entradas do usuário e modificar, instantaneamente, o mundo virtual e as ações sobre ele (capacidade reativa). As pessoas são cativadas por uma boa simulação em que as cenas mudam em resposta aos seus comandos, o que se constitui na característica mais marcante dos vídeo games (KIRNER, 1998). Um exemplo prático desse conceito seria uma luva de RV, onde se possa tocar e girar um modelo tridimensional que se encontra em seu campo de visão e, este, responder como se fosse um objeto sendo girado no mundo real.
- **Envolvimento** – Está ligada ao grau de motivação para o engajamento de uma pessoa com determinada atividade. O envolvimento pode ser passivo, como ler um livro ou assistir televisão, ou ativo, ao participar de um jogo com algum parceiro. A RV tem potencial para os dois tipos de envolvimento ao permitir a exploração de um ambiente virtual e propiciar a interação do usuário com o mundo virtual dinâmico (KIRNER, 1998).

## 2.5 Formas de Interação em Ambientes Virtuais

De acordo com Dizeró, existem quatro principais formas de interação entre o usuário e o ambiente virtual: movimentação, seleção, manipulação e escala (DIZERÓ, 1999). Contudo, outras formas de interação são referenciadas em (MINE, 1995; STUART, 1996), quais sejam: interação por janelas e *menu* virtual, criação de objetos e modificação de propriedades do mundo ou dos objetos.

- **Movimentação** – A movimentação ou navegação, em RV, é uma das interações mais comuns encontradas em ambientes virtuais. Dentro de um mundo tridimensional virtual, pode-se caminhar, correr, flutuar, voar, nadar. Deste modo, a aplicação pode oferecer diversas maneiras para o usuário mover-se pelo mundo virtual. Essa movimentação pode ser realizada por dispositivos físicos convencionais (*mouse*) ou por rastreamento de movimentos (com dispositivos não convencionais, tais como uma luva).

- **Seleção** – A seleção em mundos virtuais implica em escolher (selecionar) um objeto com o qual deseja-se interagir. Por exemplo, em um supermercado virtual, o usuário poderia escolher quais produtos deseja comprar, selecionando alguns objetos.
- **Manipulação** – Manipular um objeto em ambiente virtual consiste em mudar o posicionamento do objeto ou mudar sua orientação. O mapeamento entre a distância movida pela mão do usuário no mundo real e a distância movida pelo objeto no mundo virtual pode ser de 1:1, ou alguma outra proporção.
- **Escala** – Refere-se às dimensões em que o mundo será apresentado ao usuário. A escala sempre requer que exista um centro desta, que corresponde ao ponto que os objetos tomam como referência para movimentação quando o ambiente é aumentado ou diminuído.

## 2.6 Formas de Envolvimento em Ambientes

Um aplicativo de RV pode proporcionar um envolvimento do usuário sob três formas diferentes: Passiva, Exploratória ou Interativa (ADAMS, 1994):

- **RV passiva** – Proporciona ao usuário uma exploração do ambiente automática e sem interferência. A rota e os pontos de observação são explícitos e controlados exclusivamente pelo software. O usuário não tem controle algum, exceto talvez, para sair da sessão.
- **RV exploratória** – Proporciona uma exploração do ambiente dirigida pelo usuário. O participante pode escolher a rota e os pontos de observação, mas não pode interagir de outra forma com entidades contidas na cena.
- **RV interativa** – Proporciona uma exploração do ambiente dirigida pelo usuário e, além disso, as entidades virtuais do ambiente respondem e reagem às ações do participante. Por exemplo, se o usuário move o ponto de

observação em direção à porta, esta pode parecer abrir-se, permitindo ao participante passar por ela.

A navegação em ambientes virtuais é controlada pelo posicionamento do observador no mundo virtual, o chamado ponto de observação “*viewpoint*”. A navegação é, provavelmente, a forma mais simples de interação encontrada em muitas aplicações de RV.

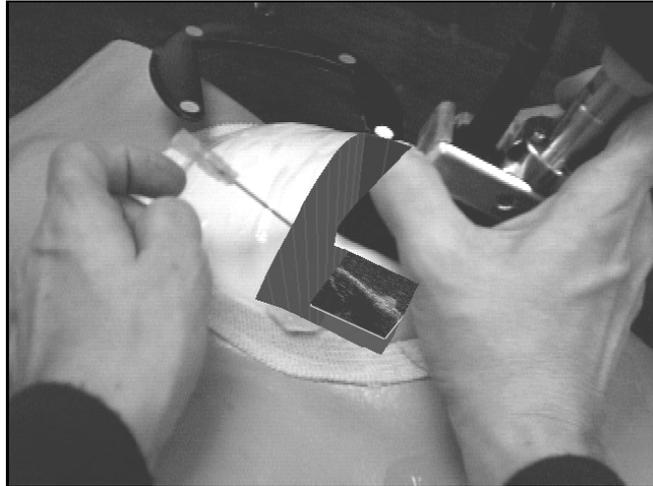
## **2.7 Aplicações da Realidade Virtual**

Os campos de aplicação de tecnologias que utilizam Realidade Virtual são bem abrangentes. A RV começou a ser aplicada em ambientes militares. Com a evolução da tecnologia, foi expandindo os seus campos de atuação, iniciando com a área médica e seguindo pelas mais diversas áreas como o treinamento, marketing, entretenimento e a área de energia.

### **2.7.1 Aplicações Médicas e em Saúde**

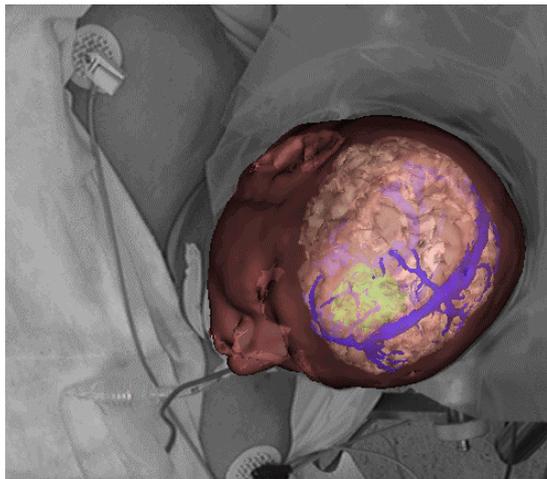
Os computadores tiveram um grande impacto na medicina, desde a monitoração de pacientes até o processamento de imagens tomográficas tridimensionais. No entanto, as aplicações de realidade virtual na medicina foram muito além, possibilitando, por exemplo, o treinamento cirúrgico em cadáveres virtuais.

Algumas aplicações de realidade virtual na medicina e saúde são: ensino de anatomia; visualização com realidade aumentada; planejamento cirúrgico; simulação cirúrgica; terapia virtual; tratamento de deficientes; fisioterapia virtual; cirurgias pouco invasivas; entre outros (TORI *et al.* 2006). A Figura 2.7 ilustra a visualização em tempo real de uma biópsia em uma mama.



**Figura 2.7 – Visualização em tempo real de uma biópsia em uma mama.**

Outros campos da RV bastante aplicados na medicina são a Realidade Virtual Aumentada (RA, Augmented Reality) e Realidade Virtual Melhorada (RM, Enhanced Reality), sendo duas áreas da RV que utilizam tecnologias específicas para aumentar o desempenho humano na realização de tarefas. Estas permitem combinar imagens geradas no mundo virtual com imagens do mundo real, por meio de um capacete parcialmente transparente, provido de sensores. O objetivo é suplementar um cenário real com informações geradas pelo computador (NETTO *et al.*, 2002). As Figuras 2.8 e 2.9 mostram sistemas de assistência sendo utilizados na realização de cirurgias (STATE *et al.*, 1996, MACHADO, 2003).



**Figura 2.8 – Sobreposição de imagens ao mundo real para assistência durante um procedimento cirúrgico (MACHADO, 2003).**



Figura 2.9 – Aplicação em realidade aumentada para área médica (STATE *et al.*, 1996).

Outros exemplos de modalidades contempladas com simuladores baseados em realidade virtual são: exame de toque para detecção de câncer de próstata (BURDEA *et al.*, 1998), prática de sutura (Figura 2.10) (WEBSTER *et al.*, 2001; HALUCK *et al.*, 2000), detecção de tumores subcutâneos (DINSMORE *et al.*, 1997), planejamento de cirurgias maxilofaciais (SCHUTYSER *et al.*, 1999) e planejamento de neurocirurgias (GUAN *et al.*, 1998).



Figura 2.10 – Imagem de um treinamento em prática de sutura sendo executado em um simulador (HALUCK *et al.*, 1998).

## 2.7.2 Aplicações em Educação

Educação pode ser pensada como um processo de exploração, descoberta, observação e construção da nossa visão do conhecimento. Pode-se relacionar essas características às dos ambientes virtuais: imersão, envolvimento e interação.

A potencialidade dos ambientes virtuais está no fato de permitir, de uma maneira nova e diferente, que pessoas possam fazer coisas que elas não poderiam normalmente fazer no mundo físico, como voar, visitar lugares que não existam ou de difícil acesso, através da manipulação e análise do próprio objeto de estudo (BYRNE, 1995; KIRNER, 1998; PINHO, 1998, MEIGUINS, 1999).

A área de educação tem muito a ganhar com a realidade virtual, tanto no ensino convencional, quanto no ensino à distância. Algumas aplicações incluem: laboratórios virtuais; encontros remotos de alunos e professores para terem uma aula ou alguma atividade coletiva; participação em eventos virtuais; consulta a bibliotecas virtuais; educação de excepcionais, entre outros (TORI *et al.* 2006).

Dentre essas aplicações, destaca-se o projeto “*Science Space*”, desenvolvido pela Universidade de Houston e a Universidade George Mason, em parceria com a NASA (DEDE *et al.*, 1996), tendo como objetivo avaliar o uso da Realidade Virtual imersiva como ambiente de aprendizado construtivista de conceitos da física. É composto de três ambientes virtuais que correspondem a:

- “*Newton World*” (estudo da mecânica newtoniana);
- “*Maxwell World*” (experimentos com conceitos de fluxo de carga elétrica);
- “*Pauling World*” (estudo da formação de moléculas).

Estes ambientes são apresentados a seguir na Figura 2.11.

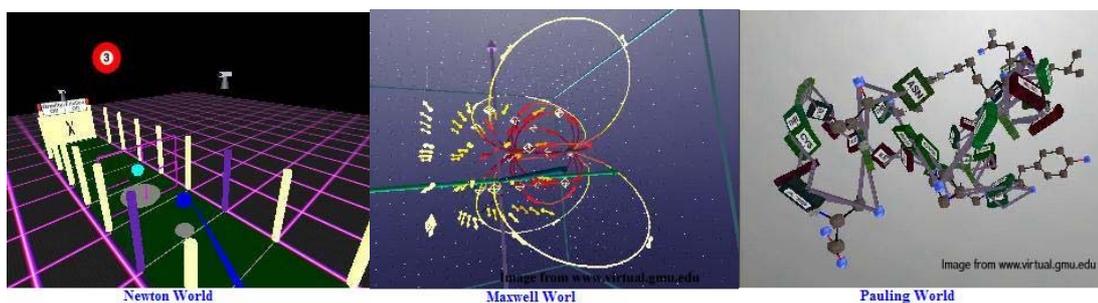


Figura 2.11 – Ambiente Virtual de Projeto *Science Space* (DEDE *et al.*, 1996).

Outra aplicação de RV voltada para a educação é o Projeto Professor Virtual, que visa disponibilizar o acesso ao conhecimento, através de sistemas de educação à distância. O projeto baseia-se no uso de RV, oferecendo aos seus usuários (professores e alunos), interfaces virtuais tridimensionais. Esse ambiente permite ao

professor ser transportado para uma sala de aula remota e receber as informações da classe, podendo interagir com os alunos como se estivesse presente, Figura 2.12 (DIZERÓ, 1998; MEIGUINS, 2002).

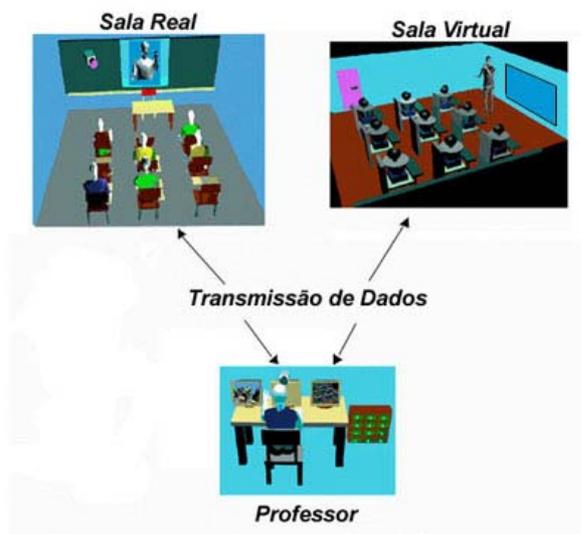


Figura 2.12 – Um dos modelos de sala virtual do Projeto Professor Virtual (DIZERÓ, 1998).

Ao conectar-se ao sistema, o aluno é representado na sala de aula virtual por um “*avatar*” (representação do usuário no ambiente virtual), o qual reflete suas ações, podendo também identificá-lo. Ele tem uma visão tridimensional da classe, podendo observar seus colegas, o professor (que possui um grande controle da sala de aula, por exemplo, na restrição de comunicação entre alunos, etc.), enfim, todo o ambiente da classe, o que lhe proporciona maior envolvimento com o sistema.

A principal vantagem, de acordo com DIZERÓ (1998), é permitir que os alunos possam participar da aula sem a necessidade de deslocamento geográfico. Além disso, entre outros fatores, este sistema caracteriza-se pela necessidade de dispositivos físicos convencionais, exigindo apenas uma rede de microcomputadores.

### 2.7.3 Aplicações em Arquitetura e Projeto

Esta área utiliza intensamente o CAD e pode ser complementada com realidade virtual para: projeto de artefatos; planejamento da obra; inspeção

tridimensional em tempo real; interação em tempo real; decoração de ambientes; avaliação acústica; entre outros (TORI *et al.*, 2006).

Um exemplo de aplicação voltado para a visualização arquitetônica foi desenvolvido por JANOWSKI *et al.* (2005).

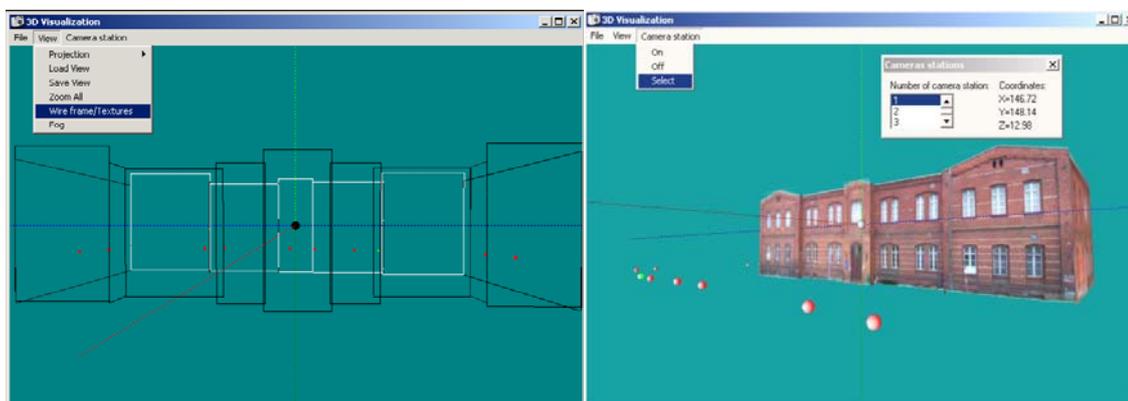


Figura 2.13 – Interface do programa com a visualização 3D de um projeto arquitetônico.

#### 2.7.4 Aplicações para Treinamento e Visualização em Sistemas Elétricos de Potência.

NETTO *et al.* (2005) apresentam o desenvolvimento de uma interface gráfica 3D utilizando a tecnologia de ambientes virtuais, auxiliando na tomada de decisão em um sistema computacional para a redução de perdas em redes de distribuição de energia elétrica. A criação de uma interface 3D foi devido à necessidade de se visualizar uma grande quantidade de dados em um sistema de distribuição, especialmente para redes de grande porte, além de facilitar a interpretação (avaliação) das soluções propostas pelo sistema e de permitir uma fácil editoração da rede de distribuição, com o objetivo de planejamento dessas redes.

Para o projeto, foi realizada a criação de uma réplica virtual 3D da cidade de São Carlos (SP) e de sua respectiva rede de distribuição primária de energia elétrica (NETTO *et al.*, 2005).

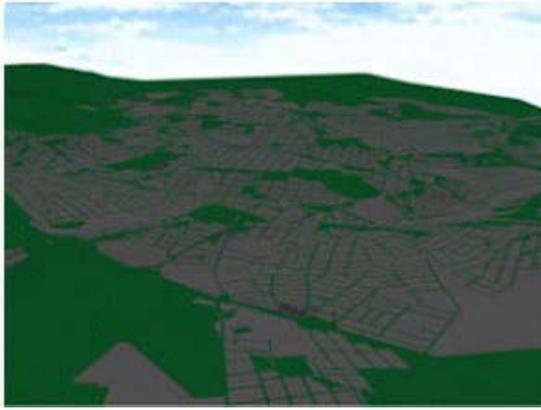


Figura 2.14 – Vista do mapa tridimensional de São Carlos (SP) que mostra a topografia da cidade.



Figura 2.15 – Vista da subestação Paraíso.



Figura 2.16 – Modelos 3D de postes

ARROYO & ARCOS (1999) apresentam um sistema de realidade virtual para treinamento pessoal, associado com a operação manual dos equipamentos de uma subestação. Este permite ao usuário conhecer os elementos básicos de uma subestação elétrica em termos de aparência, comportamento e funcionalidade, além de operar a subestação, interagindo com os equipamentos de chaveamento, como no mundo real.

JIANG GUO *et al.* (2002) utilizaram os conceitos de Manutenção Baseada na Condição, “*Condition-Based Maintenance*” (CBM) (ZHANG HONGHUO *et al.*, 2002; GARAGA, *et al.*, 2001; TEAL & SORENSEN, 2001), como modalidade metodológica no gerenciamento de manutenção aplicada às Unidades Hidrogeradoras, agregado a um sistema de RV baseado em computador pessoal. Este sistema desenvolvido provê indicações vitais das condições dos equipamentos, alertas de problemas latentes, guia de manutenção *on-line*, entre outros.

JIANG GUO *et al.* (2003) aplicaram os conceitos de RV no desenvolvimento de um sistema de visualização baseado em computador pessoal (*Desktop*), voltado

para uma Unidade Hidrogeradora (UHG). As estruturas físicas e as interações internas da UHG nas várias condições, mesmo aquelas que são invisíveis no mundo real, podem ser visualmente demonstradas em detalhes por esse sistema, dando suporte ao treinamento numa usina hidroelétrica.

LOPES *et al.* (2006) desenvolveram um simulador virtual de uma UHG, sendo possível observar uma animação da usina em operação, podendo-se aplicar determinadas contingências, também observáveis no ambiente virtual, estendendo as funcionalidades estáticas dos ambientes desenvolvidos por JIANG GUO *et al.*, (2003), conforme mostram as Figuras 2.17 e 2.18.

Comparado com os trabalhos anteriores de JIANG GUO *et al.* (2002) e JIANG GUO *et al.* (2003), o sistema desenvolvido por LOPES *et al.* (2006) apresenta a implementação de modelos dinâmicos da UHG, incluindo a modelagem do conjunto turbina-gerador e seus dispositivos de regulação, onde as grandezas mecânicas desses modelos, extraídas da simulação, se integram ao ambiente virtual através de uma visualização animada das partes mecânicas da turbina, ao contrário das imagens estáticas desenvolvidas em trabalhos anteriores.

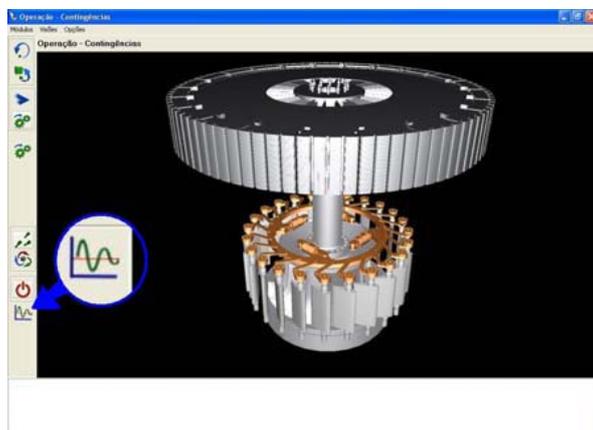


Figura 2.17 - Interface do módulo de operação, destacando o botão oscilografias.

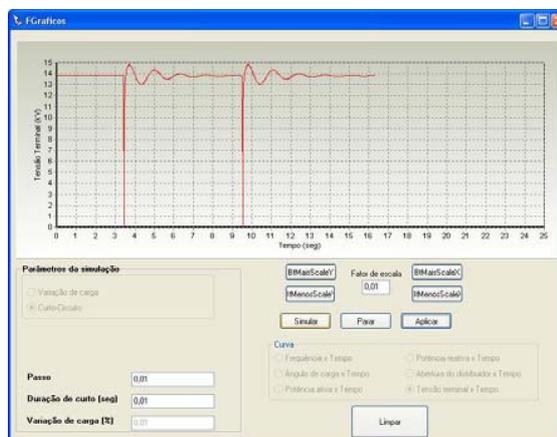


Figura 2.18 - Interface de gráficos.

NUNES *et al.* (2006) apresentam a implementação de um laboratório virtual para um sistema eólico, especificamente desenvolvido para a análise dinâmica do comportamento de um aerogerador interligado a um sistema de potência. A construção de um ambiente virtual tridimensional representando o sistema eólico, mostrado na Figura 2.19, faz parte do interesse de desenvolver um laboratório virtual

de treinamento de profissionais e estudantes do setor energético na área de fontes renováveis.

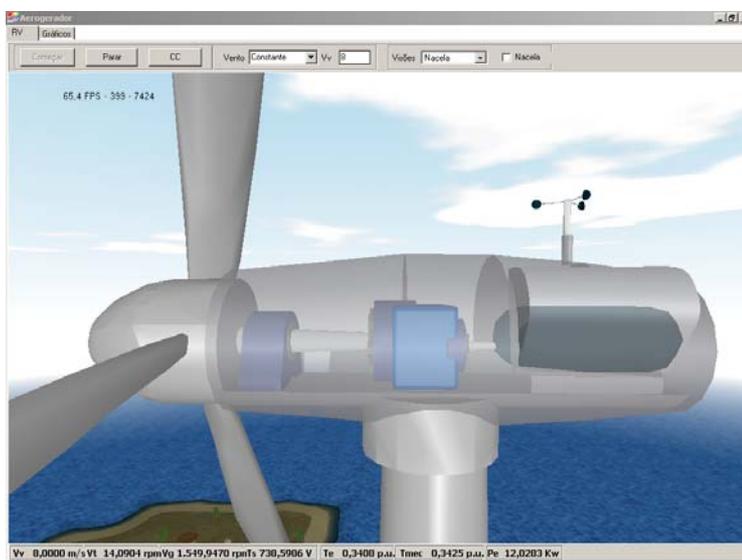


Figura 2.19 – Visão da Nacela (Nunes *et al.*, 2006).

O ambiente virtual desenvolvido possibilita ao usuário visualizar o sistema eólico, em tempo real, acompanhando o comportamento dinâmico ou em regime permanente do aerogerador, tornando possível assim, observar certas características dinâmicas do sistema, que nos softwares convencionais só seriam observadas através de gráficos de simulações.

O ambiente também propicia ao usuário informações das variáveis do sistema ao longo do tempo, como por exemplo, velocidade do eixo do gerador, tensão gerada, potência, torque elétrico, corrente, entre outros.

Uma grande vantagem do software desenvolvido é a possibilidade de acoplar as características dos modelos dinâmicos dos dispositivos do sistema eólico ao ambiente RV. Assim, pode-se trabalhar tanto com os sistemas eólicos de velocidade fixa, quanto os de velocidade variável (NUNES *et al.*, 2003), considerando nestes últimos também a operação dos conversores estáticos. A ideia futura é implementar mecanismos de controle nestes sistemas.

## **2.8 Considerações Finais**

Este capítulo estabeleceu uma visão geral sobre realidade virtual, envolvendo conceitos e características relevantes desta tecnologia, contextualizando o avanço da mesma, exemplificando algumas de suas aplicações na área de educação e treinamento, citando alguns trabalhos voltados para a área de geração de energia de grande importância para a motivação desta dissertação.

A RV pode então ser vista como um salto qualitativo em relação às interfaces gráficas tradicionais. Por seu uso, o usuário percebe a aplicação como um ambiente virtual tridimensional. A interface dentro deste ambiente virtual procura reproduzir a realidade de um determinado contexto, buscando produzir a sensação de presença neste ambiente, através da criação dos mundos virtuais gerados por computador. Assim, a RV disponibiliza, com a utilização do computador, um novo paradigma de interface com o usuário.

## **CAPÍTULO 3 – A USINA HIDROELÉTRICA DE TUCURUÍ**

### **3.1 Introdução**

Uma vez que o ambiente virtual tratado nesta dissertação está voltado totalmente para a modelagem de uma Usina Hidroelétrica, este capítulo visa abordar alguns princípios básicos de geração hidráulica e o esquema construtivo de usinas hidroelétricas, com ênfase na infra-estrutura da Usina Hidroelétrica de Tucuruí, tomada como base para o estudo de caso na modelagem geométrica do ambiente virtual.

A geração de energia sempre constituiu um dos principais fatores para a melhoria da qualidade de vida dos povos, principalmente após o aparecimento da máquina a vapor, pilastra mestra da atual era industrial.

De acordo com o Operador Nacional do Sistema (ONS), uma usina hidrelétrica pode ser definida como um conjunto de obras e equipamentos cuja finalidade é a geração de energia elétrica, através do aproveitamento do potencial hidráulico existente em um rio.

O processo de geração de energia através de hidrelétricas envolve o armazenamento de água, conversão de energia potencial hidráulica em cinética e desta em mecânica rotacional, dentro de uma turbina hidráulica, e, finalmente, conversão de energia mecânica rotacional em energia elétrica, através de um gerador elétrico.

### **3.2 Principais Partes de uma Central Hidrelétrica**

A geração hidrelétrica está associada à vazão do rio, isto é, à quantidade de água disponível em um determinado período de tempo e à altura de sua queda. Quanto maiores forem os volumes de sua queda, maior é seu potencial de aproveitamento na geração de eletricidade. A vazão de um rio depende de suas condições topográficas, como largura, inclinação, tipo de solo, obstáculos e quedas. É determinada ainda pela quantidade de chuvas que o alimentam, o que faz com que sua capacidade de produção de energia varie bastante ao longo do ano.

A capacidade de geração de energia de uma usina hidrelétrica é função da queda e vazão da água descarregada através da turbina hidráulica, conforme a Equação (3.1) a seguir (BROCKHINK *et al.*, 2001).

$$P = 9,8 \cdot \eta \cdot Q \cdot H \quad (3.1)$$

Onde:

- $P$  – Potência (kW);
- $\eta$  – Eficiência da usina;
- $Q$  – Vazão (m<sup>3</sup>/s);
- $H$  – Queda (m).

Basicamente, uma central hidroelétrica compõe-se das seguintes partes, descritas a seguir, cada qual constituindo um conjunto de obras e instalações, projetadas harmonicamente para poder operar eficientemente em conjunto (SOUZA, *et al.*, 1983; KIMURA, 2005):

- Barragem;
- Captação e conduto forçado;
- Casa de máquinas;
- Restituição de água.

O grau de complexidade de cada uma dessas partes depende de diversos fatores, tais como a potência, localização da casa de máquinas em relação à captação e à restituição, dentre outros. Na Figura 3.1 tem-se um perfil lateral por completo de uma UHE, com o descritivo visual de cada componente desta, abrangendo desde a barragem até a restituição de água. Nesta figura destaca-se a barragem, por onde a água é represada; em seguida esta é levada até a turbina através do conduto forçado, movimentando o rotor da turbina internamente, o qual transforma a energia em mecânica rotacional, onde por fim, a água é restituída a jusante.

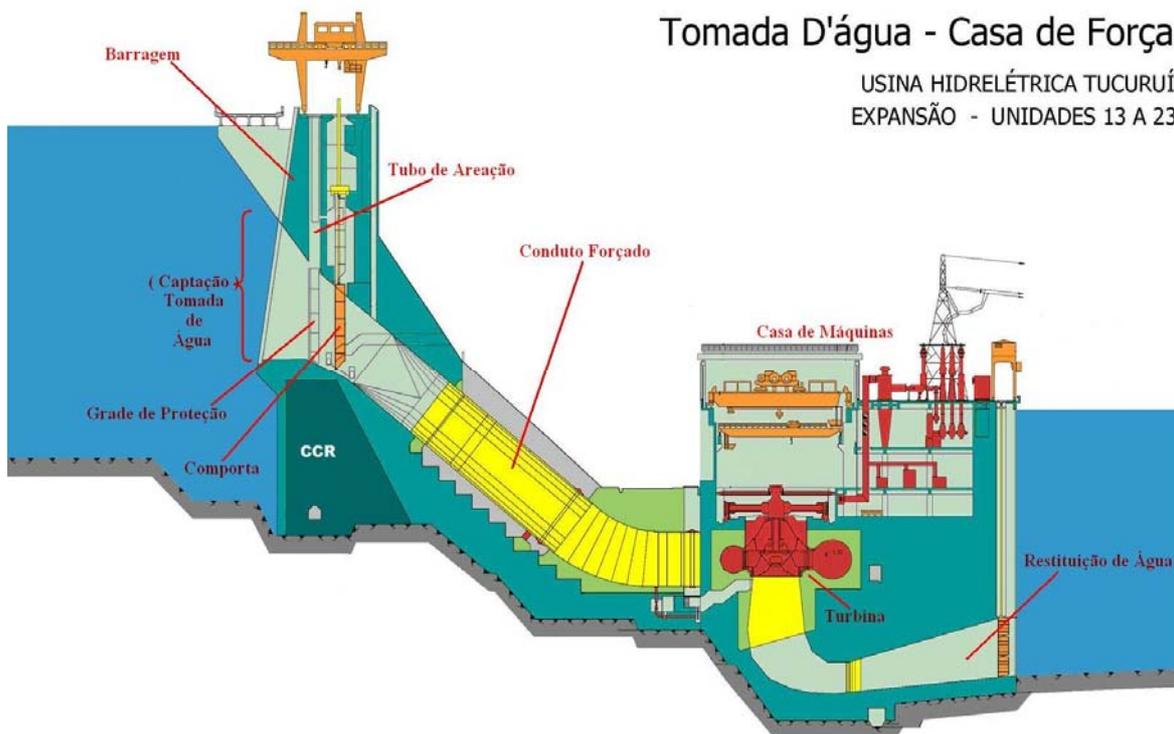


Figura 3.1 – Unidade Hidroelétrica de Energia.

### 3.2.1 Barragem

Constituem obras transversais aos leitos dos rios, bloqueando a passagem da água. Funcionalmente, destinam-se a:

- Represar as águas do rio para permitir sua captação e desvio;
- Elevar o nível das águas, a fim de proporcionar um desnível adequado a um aproveitamento hidrelétrico, ou condições de navegabilidade ao rio, garantindo profundidade adequada.
- Proporcionar o represamento do rio para a formação de reservatórios regularizadores de vazões para diversos tipos de aproveitamentos ou para o amortecimento de ondas de enchentes.

### 3.2.2 Captação e Conduto Forçado

#### a) Tomada de Água

É o ponto onde se inicia a condução da água para as turbinas. Pode estar incorporado à barragem ou constituir uma estrutura independente.

Pode, outrossim, operar em pressão ou também com superfície livre, dependendo de se tratar de barragem reservatório ou barragem de simples captação, respectivamente.

Seu equipamento consta, basicamente, do seguinte:

- **Grade de proteção** – Com a finalidade de interceptar material carregado pelo rio e que possa danificar ou travar as turbinas (pedras, galhos e árvores etc.). São constituídas normalmente por painéis de barras de seção retangular, cujo espaçamento depende da dimensão mínima de material que se deseja reter.
- **Comporta** – Destina-se a abrir ou fechar a admissão da água nos condutos. São equipadas em geral com um sistema de fechamento rápido para casos de emergência. Além das comportas existe, em geral, um sistema de vigas de vedação “*stop-logs*” que permitem o fechamento da tomada de água para fins de manutenção das comportas. Podem, igualmente, ser equipadas com comportas auxiliares para o enchimento dos condutos, proporcionando equilíbrio hidrostático em ambos os lados das comportas principais, reduzindo os esforços necessários a sua abertura. As funções da comporta são:
  1. Estancar a água que vai para o sistema condutor, permitindo a sua manutenção;
  2. Abrir o fundo da tomada de água, de maneira a retirar a areia que, com o tempo, é depositada;
  3. Fechar os tubos de desvio do rio, durante a condução da barragem, para encher o reservatório.

No primeiro caso, as comportas são chamadas de “manutenção”, no segundo, de “desaeração” e no terceiro, de “fundo”.

- **Tubo de aeração** – Nas tomadas de água em pressão, imediatamente a jusante das comportas, deve haver um tubo ou galeria vertical aberto em sua parte superior para permitir a entrada de ar na tubulação após um fechamento

rápido das comportas, no sentido de evitar a formação de depressões no interior das tubulações de adução que poderiam levar ao seu esmagamento.

## **b) Conduto Forçado**

Destina-se à condução da água da barragem às turbinas, sendo formado por condutos fechados, em que por escoamento se dá à pressão crescente de montante para jusante, estando sua parte inferior submetida à pressão máxima do aproveitamento. Podem ser executados tanto em galerias como a céu aberto.

No primeiro caso, serão sempre revestidos para reduzir o coeficiente de atrito causador das perdas dinâmicas. O revestimento poderá ser dimensionado para resistir a toda pressão interna do conduto nos casos em que a rocha não permite que se conte com sua colaboração. Tal revestimento poderá ser feito com concreto armado ou com chapas de aço. Em quaisquer dos casos deve-se assegurar a impermeabilização do conduto.

### **3.2.3 Casa de Máquinas**

A casa de máquinas é o local onde são instaladas as máquinas motrizes e os geradores. Geralmente abriga uma área destinada aos serviços de manutenção e instalação dos quadros de medição e de comando e dos circuitos de proteção. A casa de máquinas é uma construção para abrigo do sistema gerador de energia elétrica e deve ser compatível com as máquinas ali instaladas. Os materiais de construção podem ser quaisquer, dependendo das disponibilidades locais. Usualmente são utilizados madeira ou alvenaria de tijolo, materiais bastante difundidos e de custo baixo.

As dimensões da casa de máquinas são determinadas em função das medidas do conjunto gerador. É usual providenciar-se uma folga equivalente a 70% dos maiores tamanhos horizontais do grupo gerador, e uma folga de 50% com relação à maior dimensão vertical.

Como a rede de transmissão da energia exige níveis de alta tensão, deverá existir uma estação transformadora. Nesse caso, o transformador deve ser montado fora da casa de máquinas para que dissipe o calor com a maior ventilação. Ele deve ser devidamente cercado por alambrados, por razões de segurança nas subestações.

### **3.2.4 Restituição de Água**

Uma vez turbinada, a água deve ser restituída ao leito do rio. Neste ponto, a energia é mínima, pois se pressupõe que o máximo foi retirado.

A restituição se inicia à saída dos tubos de sucção nas máquinas a reação ou à saída das pás das máquinas a ação, e, por isso mesmo, deve estar o mais próximo possível dos leitos naturais dos rios.

## **3.3 Turbinas Hidráulicas**

As turbinas hidráulicas são projetadas para transformar a energia mecânica (a energia de pressão e a energia cinética) de um fluxo de água, em potência mecânica no seu eixo. São partes integrantes das Usinas Hidrelétricas, sendo acopladas a um gerador elétrico, o qual é conectado à rede de energia.

### **3.3.1 Definição**

A TB-74 da ABNT define os tipos e os componentes das turbinas hidráulicas, como segue:

**Turbina hidráulica** – Máquina com a finalidade de transformar a maior parte da energia de escoamento contínuo da água que a atravessa em trabalho mecânico. Consiste, basicamente, de um sistema fixo hidráulico e de um sistema rotativo hidromecânico destinados, respectivamente, à orientação da água em escoamento e à transformação em trabalho mecânico.

### 3.3.2 Tipos de Turbinas Hidráulicas

O tipo de turbina hidráulica selecionado para uma aplicação particular é influenciado pela queda e vazão. Existem duas classificações de turbinas hidráulicas: turbinas de ação (impulso) e de reação, como descritas a seguir (SIMONE, 2003):

- **De reação** – Aquela em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação das energias cinética e de pressão da água em escoamento, através do elemento do sistema rotativo hidromecânico (rotor). As turbinas hidráulicas de reação são do tipo Francis, e hélice (Kaplan), podendo ser: de eixo horizontal, vertical ou inclinado; com um ou mais rotores, em caixa aberta ou fechada, com tubo de sucção cônico reto ou cônico em cotovelo.
- **De ação** – Aquela em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação da energia cinética da água em escoamento, através do elemento do sistema rotativo hidromecânico (rotor). As turbinas hidráulicas de ação são do tipo Pelton, podendo ser: de eixo vertical ou horizontal; com um ou mais rotores em um ou mais injetores.

#### a) Turbinas Pelton

São classificadas como turbinas de ação por possuírem a característica de transformar a energia cinética do jato injetor em energia mecânica (ver Figura 3.2). O uso é adequado para locais onde haja altas quedas e baixas vazões. Apresenta bons rendimentos onde há grande variação de carga, podendo ser operadas entre 10 e 100% de sua potência máxima.

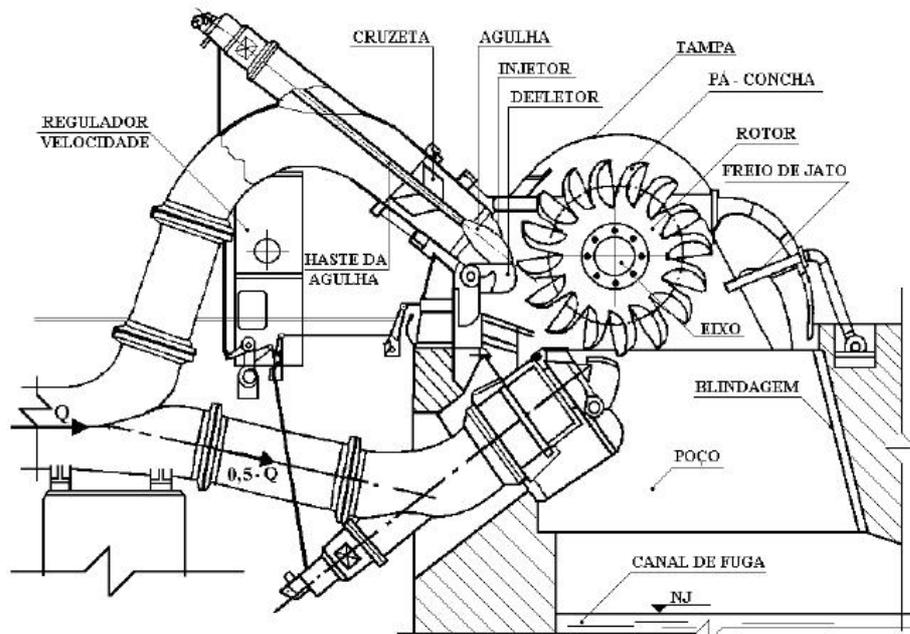


Figura 3.2 – Turbina Pelton, de dois (02) jatos e eixo horizontal.

## b) Turbina Francis

É a turbina de maior uso em quedas e vazões médias, como na Figura 3.3. Apresentam um alto rendimento, tanto mais alto quanto maior for a potência. Para baixa potência o rendimento situa-se em torno de 77%. Grandes máquinas apresentam valores superiores a 90%. Esta turbina pode ser instalada em caixa espiral (média quedas – acima de 10 m), ou em caixa aberta (baixas quedas – abaixo de 10 m). Pode-se lançar mão do uso de turbina Francis de rotor duplo ou gêmeo com o objetivo de substituir o rotor Hélice ou Kaplan que são de construção delicada e de alto custo.

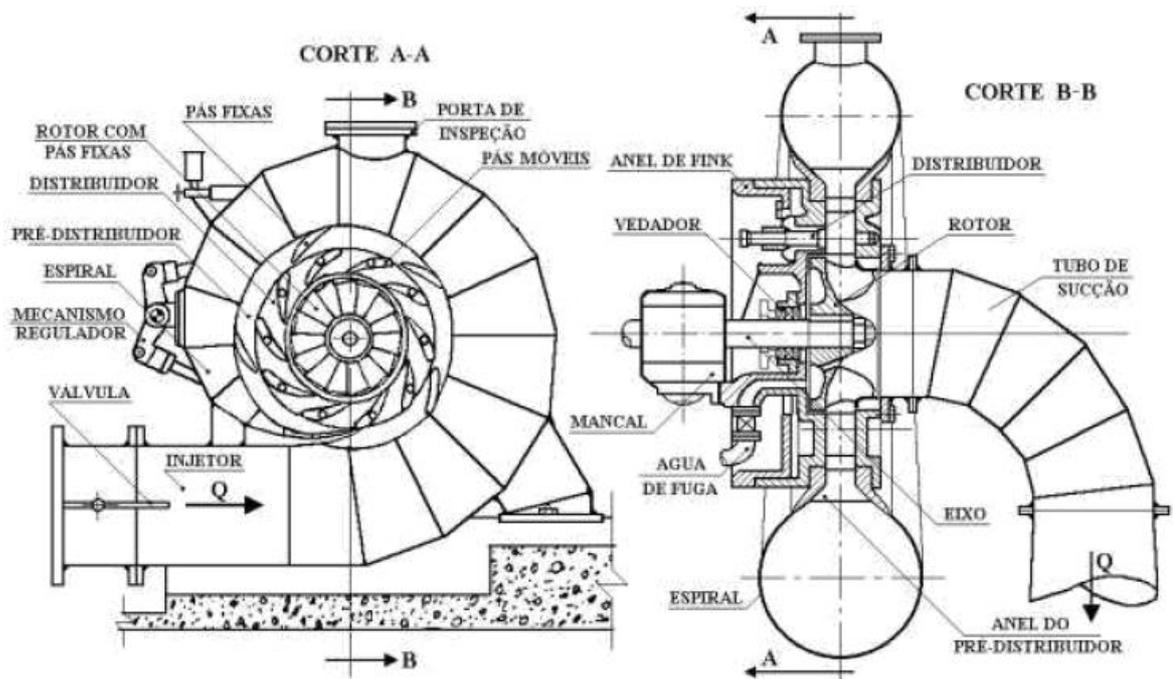
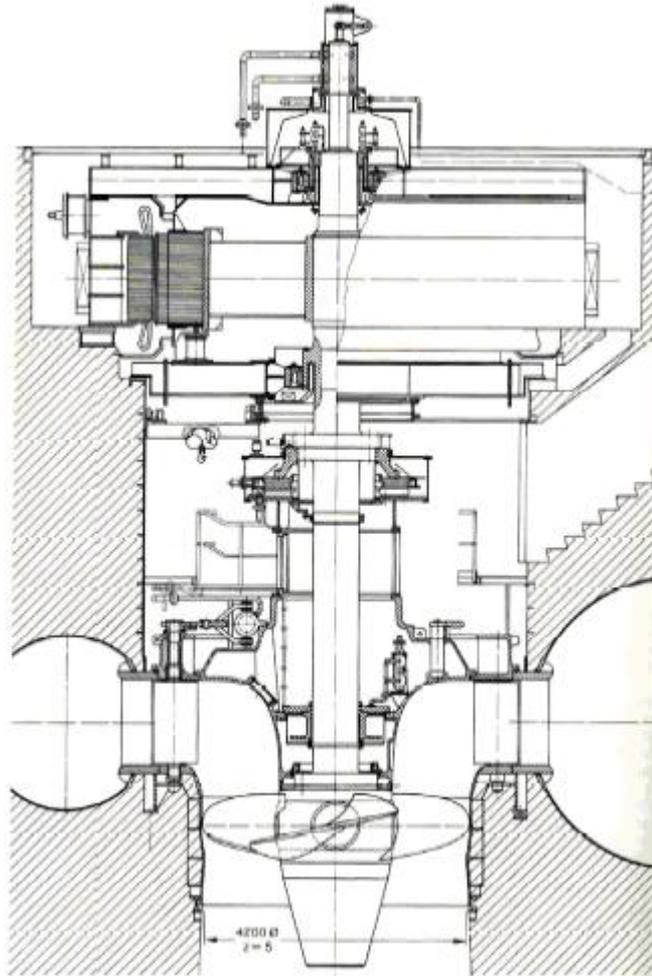


Figura 3.3 – Partes principais da turbina Francis.

### c) Turbina Hélice ou Kaplan

Também chamadas propulsoras, são fabricadas com as pás do rotor fixas e são indicadas para centrais de pequeno porte com grandes vazões e baixas quedas (ver Figura 3.4). Podem vir montadas dentro de uma caixa espiral ou tubular. Em ambos os casos, a vazão só é controlada pelo distribuidor. Devido às suas características hidrodinâmicas, este tipo de turbina é indicado somente para trabalhar a plena carga, permitindo pouca variação na vazão. Não são indicadas para uso em meio rural devido a sua dificuldade de dimensionamento e fabricação de alto custo.



**Figura 3.4 – Turbina Kaplan: Central Hidrelétrica de Machicura, Chile; (duas) 02 máquinas de 36,7 m; 144,2 m<sup>3</sup>/s e 48,4 MW.**

### **3.4 A Usina Hidroelétrica de Tucuruí**

O estudo de caso deste trabalho utiliza como referência as plantas da Usina Hidrelétrica (UHE) de Tucuruí, na construção dos modelos tridimensionais realistas (CAD) que são usados no mundo virtual.

A UHE de Tucuruí, construída e operada pela ELETRONORTE, pertencente ao sistema interligado, está situada no rio Tocantins, bacia hidrográfica de mesmo nome, no Estado do Pará, logo a montante da cidade de Tucuruí, a cerca de 300 km em linha reta da cidade de Belém, aproximadamente na latitude 3°45' Sul e longitude de 49°41' Oeste. É considerada a segunda maior usina hidrelétrica brasileira (a primeira se for considerado apenas investimento nacional) e a quinta maior do mundo em potência instalada. Uma vista da UHE de Tucuruí está exposta na Figura 3.5.

A ELETRONORTE assumiu a responsabilidade dos estudos de inventário do rio Tocantins e da viabilidade da UHE de Tucuruí em 20/06/1973, na mesma época de sua criação, a qual foi inaugurada em 22/11/1984.

Sua construção divide-se em duas etapas, onde a potência instalada na 1ª Etapa foi de 4245 MW (12 unidades de 330 MW e 2 unidades auxiliares de 20 MW). Na 2ª Etapa, as 11 (onze) turbinas constituintes das unidades hidrogeradoras (UHG), unidades 13 a 23, são do tipo Francis de eixo vertical, totalizando 8.370 MW. Para o dimensionamento das turbinas hidráulicas da primeira e segunda Etapa, foram considerados os seguintes parâmetros, conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Dados técnicos das UHG, para 1ª e 2ª Etapa.

	Primeira Etapa	Segunda Etapa
<b>Potência [MW]</b>	330	382
<b>Velocidade [RPM]</b>	81,8	81,8
<b>Queda [m]</b>	61,7	61,7
<b>Qte máquinas</b>	12	11



Figura 3.5 – Arranjo geral da UHE de Tucuruí – primeira etapa.

### 3.4.1 Turbina Francis da usina hidrelétrica de Tucuruí

Para estudo de uma planta real da UHE, além de conhecer na prática o funcionamento desta, foi realizada uma visita a Tucuruí com esse propósito, quando da instalação da 23ª Unidade Hidrelétrica, que foi a última a entrar em funcionamento. Foram colhidos dados fotográficos e impressos através de documentos e manuais, além de arquivos em CAD de cada parte da turbina, o que permitiu a sua reprodução virtual, de tal forma que a modelagem das peças segue rigorosamente as dimensões reais das mesmas.

Os principais componentes construtivos da turbina são: caixa espiral, o pré-distribuidor, distribuidor, o rotor, eixo e o tubo de sucção. A Figura 3.6 apresenta alguns desses componentes da turbina, e a Tabela 3.2 mostra as velocidades de operação.

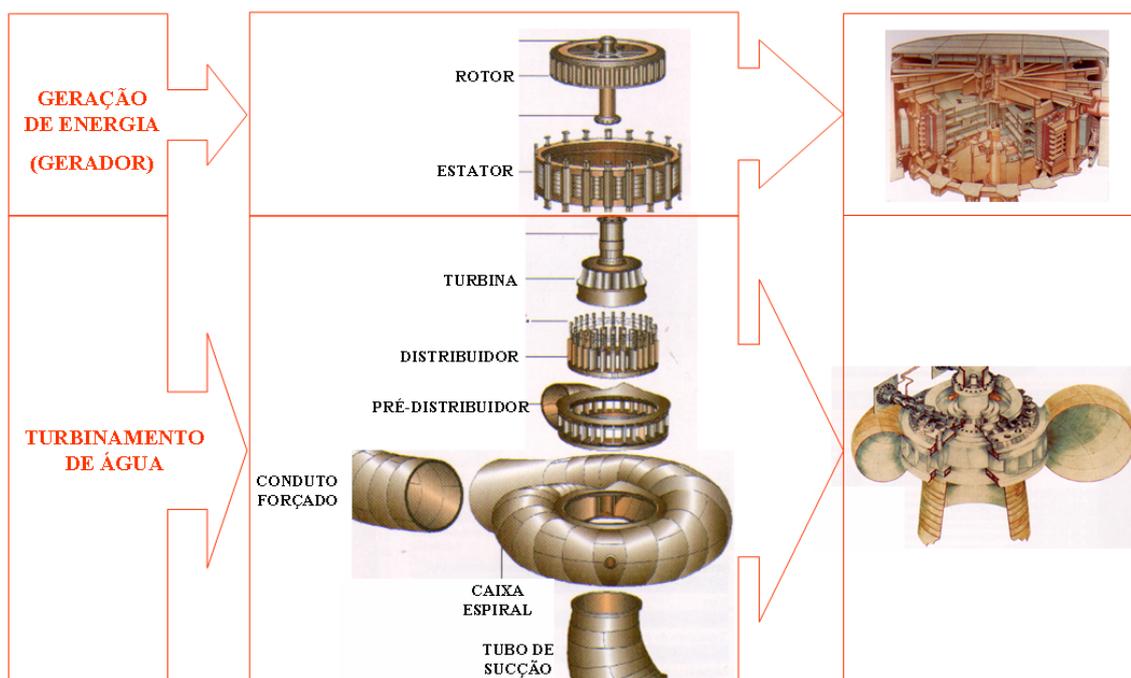


Figura 3.6 – Desenho esquemático de funcionamento de uma turbina Francis de eixo vertical.

Tabela 3.2 – Velocidades de rotação da turbina

Velocidade nominal	81,82 rpm
Velocidade durante a rejeição de carga	124,80 rpm
Velocidade de disparo	165,00 rpm

### a) Caixa espiral

A caixa espiral serve para conduzir a água trazida pelo conduto forçado até o distribuidor. É projetada para garantir descargas parciais iguais em todos os canais formados pelas pás do distribuidor; para isso sua estrutura possui o formato de um caracol injetor, conforme mostram as Figuras 3.7 e 3.8.

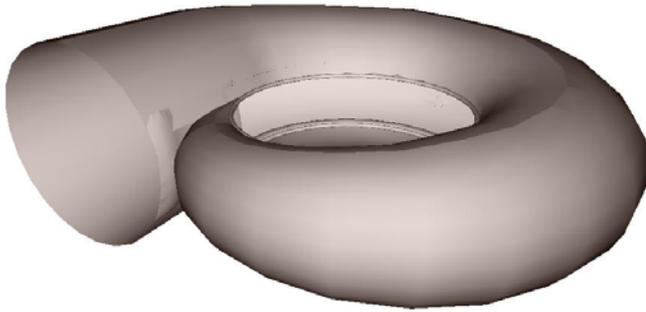


Figura 3.7 – Vistas externas da caixa espiral.

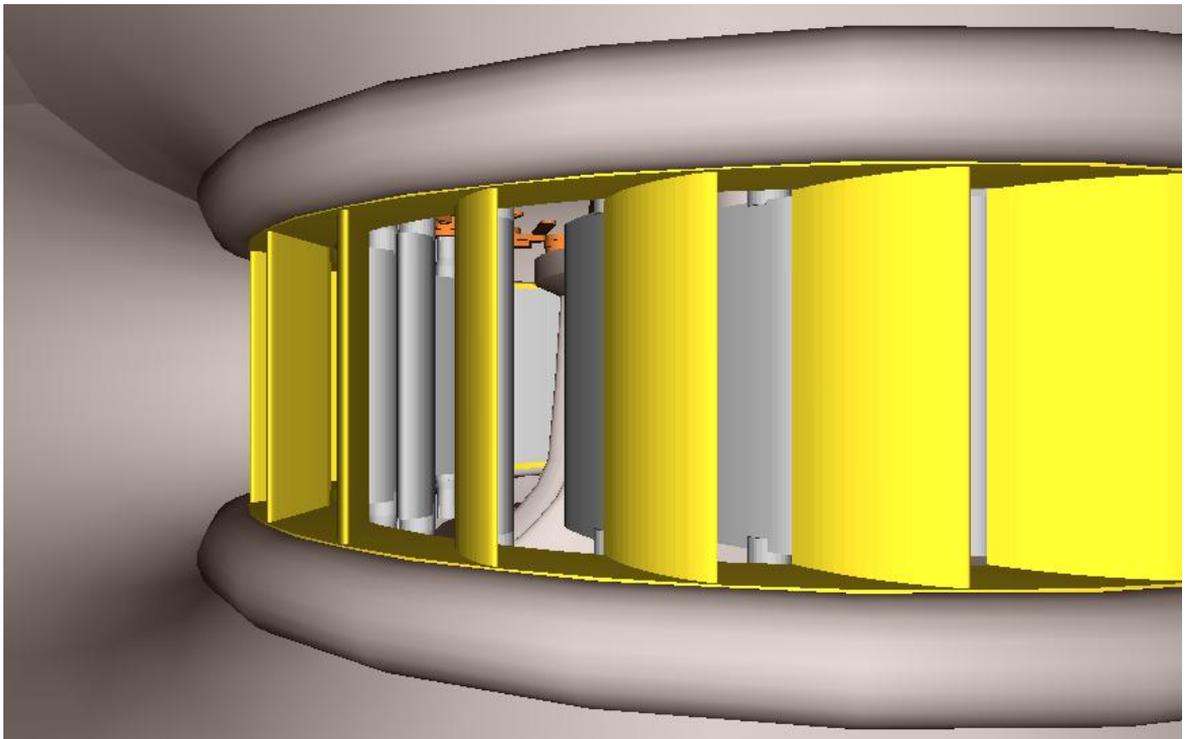


Figura 3.8 – Vista interna da caixa espiral

### c) Distribuidor

O distribuidor é o equipamento que permite variar a descarga para o rotor, de modo a dar à potência no eixo da turbina ao valor que corresponde à energia elétrica demandada. É constituído por um conjunto de pás diretrizes móveis dispostas ao redor do rotor, as quais giram simultaneamente com o mesmo ângulo, possibilitando a passagem da descarga requerida ou interrompendo-a quando necessário. Para cada valor de descarga, o ângulo das pás diretrizes mais conveniente de entrada d'água no rotor é o que gera um escoamento com mínima perda hidráulica. Estas pás possuem um eixo de rotação paralelo ao eixo da turbina, o qual, através de um mecanismo composto por um anel concêntrico de regulação ao distribuidor e ligado às pás diretrizes por bielas, giram simultaneamente em um mesmo ângulo, indo desde a máxima abertura até o fechamento total das pás diretrizes.

Os eixos das pás passam pela tampa da turbina e seu deslocamento angular é realizado com um sistema de bielas articuladas e ligadas ao anel de regulação. O anel recebe o comando para a regulação do fluxo de água de alimentação transmitido pelos servomotores colocados no plano do anel de regulação, que provocarão o movimento do anel, movendo as pás para a abertura ou ângulo desejado.

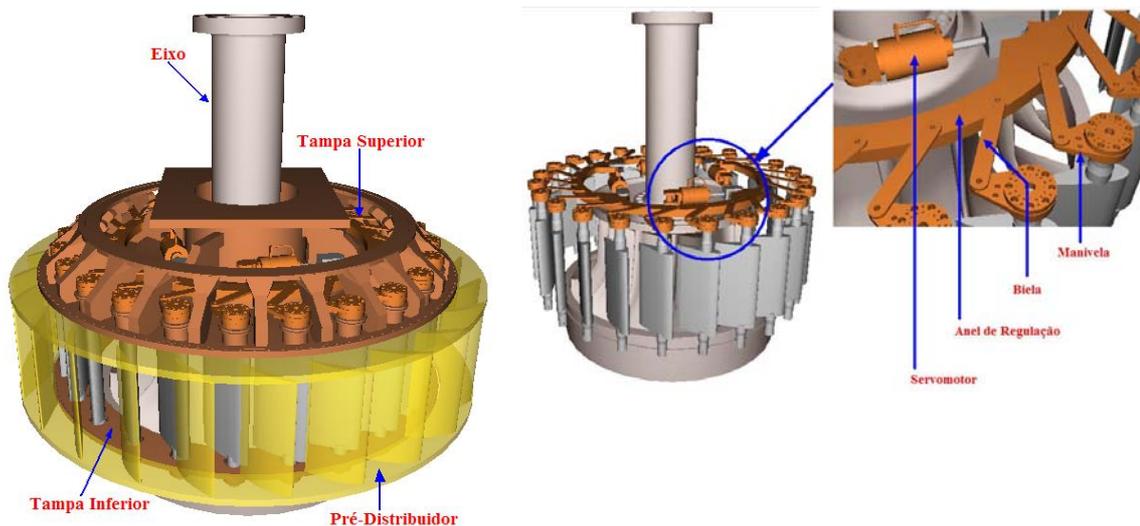


Figura 3.9 – Estrutura física do distribuidor

O distribuidor é composto essencialmente de:

- **Pré-distribuidor** - O pré-distribuidor é um conjunto de pás ou lâminas fixas colocadas na saída da caixa espiral, o qual orienta a água para o distribuidor. A inclinação destas pás corresponde à posição do distribuidor para operação normal. A finalidade do pré-distribuidor é direcionar a água para a entrada do distribuidor. É composta de dois anéis superiores, entre os quais é montado um conjunto de 24 palhetas fixas, com perfil hidrodinâmico de baixo arrasto, para não gerar perda de carga e não provocar turbulência no escoamento. É uma parte sem movimento, soldada à caixa espiral e fabricada com chapas ou placas de aço carbono. Na Figura 3.10 tem-se um esquema do pré-distribuidor.

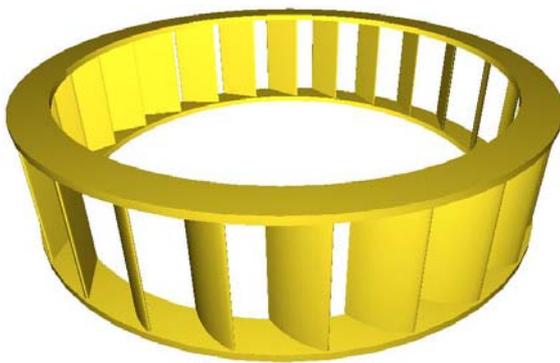


Figura 3.10 – Pré-Distribuidor.

- **Tampa superior** - Tampa constituída de duas partes montadas através de parafusos especiais. Este equipamento é fixado na parte superior do pré-distribuidor, por meio de parafusos e arruelas de ajuste, que permitem seu correto posicionamento em altura. Comporta ainda os mancais intermediários e superiores das diretrizes, bem como todo o bielismo, servomotores, mancal guia e vedação do eixo, conforme apresenta a Figura 3.11.

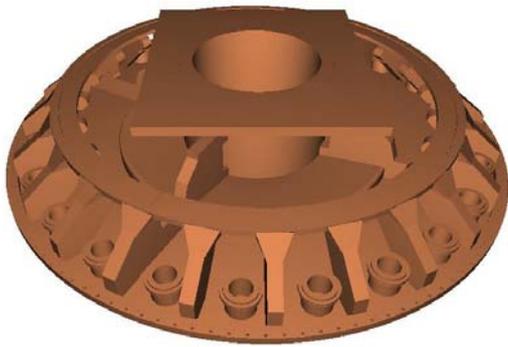


Figura 3.11 – Tampa Superior

- **Tampa inferior** - A tampa inferior é montada no campo sobre o anel de descarga, sendo este conjunto centrado e soldado diretamente sobre o flange superior do tubo de sucção. Este equipamento é fixado na parte inferior do pré-distribuidor por meio de parafusos e arruelas de ajuste, que permitem seu correto posicionamento em altura. Constituída de duas partes montadas através de parafusos especiais, comporta os 24 mancais inferiores das diretrizes.



Figura 3.12 – Tampa inferior

- **Cone suporte do mancal de escora** - Construído em chapa de aço soldada, é responsável essencialmente pela transmissão das cargas verticais (peso das partes rotativas / empuxo hidráulico) do mancal de escora à tampa superior. Esta peça é provida de dois acessos diametralmente opostos, suficientemente grandes para permitir a passagem de todas as peças do mancal de guia e da vedação do eixo. Estes acessos permitem ainda a visualização do eixo da máquina e eventuais instalações de pequenos instrumentos no mesmo.



Figura 3.13 – Cone suporte do mancal de escora.

- **Servomotores** - Em um servomotor, a energia hidráulica é convertida em movimento longitudinal para acionar um mecanismo. A força de acionamento é determinada pela pressão nos compartimentos do servomotor e pelos diâmetros do pistão e da biela. A seguir apresenta-se uma visualização gráfica e a foto do servomotor de Tucuruí.

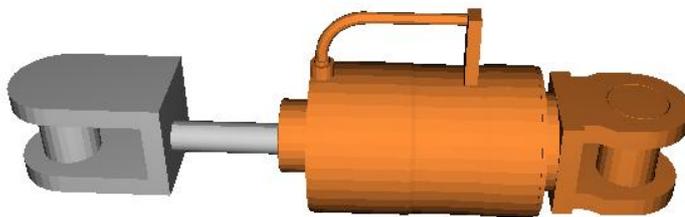


Figura 3.14 – Servomotor.

- **Palhetas diretrizes** - Fabricadas a partir de chapas e munhões forjados em aço carbono protegidos com aço inoxidável nas regiões de contato com as tampas, munhões e pontos de contato entre palhetas, são constituídas por 2 munhões fixados às tampas superior e inferior. Como na Figura 3.15.



Figura 3.15 – Palhetas diretrizes

- **Anel de regulação** - Peça responsável essencialmente pela transmissão dos esforços de abertura / fechamento realizados pelos servomotores até as palhetas diretrizes. O anel de regulação se desloca tangencialmente ao eixo da unidade, guiado por pistas auto-lubrificantes posicionadas sobre a tampa superior. É ligado diretamente aos quatro servomotores pelos olhais e a cada uma das 24 diretrizes por meio do mecanismo de regulação, como na figura abaixo.



Figura 3.16 – Anel de regulação

#### d) Rotor

O rotor é o principal componente das turbinas, pois é nele que se opera a transformação da energia hidráulica em energia mecânica sob a forma de um conjugado de forças que aplicadas às pás, transferem rotação ao rotor e ao eixo. O rotor da turbina Francis está definido conforme Norma Brasileira NBR 6445 (Turbinas hidráulicas, turbinas-bombas e bombas de acumulação) “o rotor é constituído por um certo número de pás com curvatura especial, fixas e estruturadas entre as coroas interna e externa. Neste tipo de turbina o fluxo d’água é orientado e distribuído igualmente, na direção radial, por toda a periferia da entrada do rotor, saindo na sua direção axial”. As pás devem ter curvaturas que minimizem ao máximo o problema de cavitação.

O Rotor Francis de construção fundida / soldada é constituído de cubo, coroa e 13 pás, unidos por solda, tem as superfícies internas de passagem de água adequadamente trabalhadas, para assegurar rugosidade e ondulação dentro de limites admissíveis, para atingir os níveis de rendimento de projeto.

Na parte superior do cubo, o rotor é provido de flange para o acoplamento ao eixo da turbina. Este acoplamento é realizado de modo semelhante ao do eixo do cubo do gerador.



Figura 3.17 – Rotor da Turbina Francis.

### e) Eixo da turbina

O rotor do gerador é acoplado ao flange superior do eixo através de 20 tirantes ajustados, responsáveis pela transmissão do torque mecânico e dimensionados em função do empuxo hidráulico atuante no rotor Francis e pesos das partes girantes. A seguir é apresentado o eixo utilizado nas turbinas em Tucuruí.



Figura 3.18 – Eixo da Turbina.

### f) Tubo de sucção

O tubo de sucção é parte essencial das turbinas centrípetas, com a função de manter a continuidade da massa líquida em escoamento, desde a saída do rotor até o nível da água do canal de fuga. Assim, consegue-se um aumento de queda hidráulica e, pela transformação da energia cinética que possui a água ao sair do rotor em energia de pressão, um aumento também na potência da turbina.

O tubo de sucção cria uma depressão na saída do rotor, a qual, além de recuperar a maior parte da energia cinética d'água que sai do tubo, também proporciona um desnível topográfico entre a saída do rotor e o nível do canal de fuga. O tubo de sucção é um expansor curvo e tem grande importância para que a recuperação da energia cinética remanescente ocorra com um mínimo de perdas energéticas. Seu revestimento é fabricado em segmentos de virolas, com anéis de reforço, soldados entre si, como na Figura 3.20.

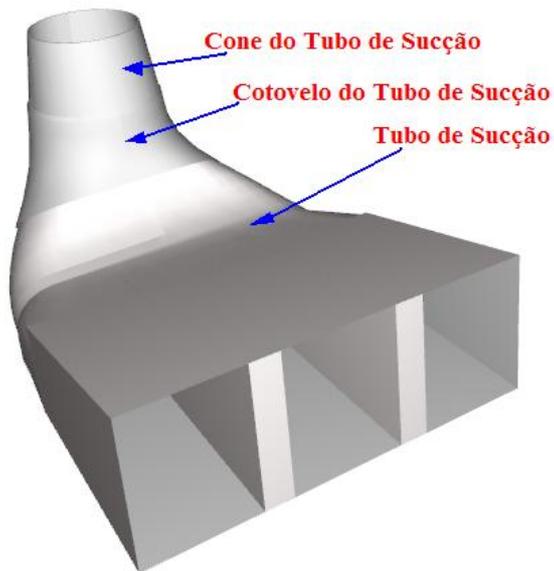


Figura 3.19 – Estrutura do tubo de sucção.



Figura 3.20 – Virolas do tubo de sucção.

### 3.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram abordados conceitos e esquemas detalhados construtivos relacionados às usinas hidrelétricas, assim como a definição e os tipos de turbinas mais comuns, presentes em tais usinas.

No estudo de caso deste trabalho utiliza-se como referência as plantas da UHE de Tucuruí, na construção dos modelos tridimensionais realistas (CAD) os quais são utilizados no mundo virtual. Daí a importância da abordagem dos aspectos construtivos da usina, apresentando-se as principais partes desta.

Para realizar o levantamento das plantas e coletar os dados necessários para a construção do aplicativo, além de conhecer na prática o funcionamento da usina, foi realizada uma visita à UHE de Tucuruí, o que proporcionou um maior entendimento para o detalhamento físico das partes constituintes de um sistema hidráulico de grande porte.

## CAPÍTULO 4 – MODELAGEM UTILIZADA NA DINÂMICA DA UHE E ALGUNS ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO SISTEMA DE REGULAÇÃO

### 4.1 Introdução

Conforme abordado no capítulo seguinte, na estrutura computacional da UHE virtual, por de trás de toda a parte visual da usina em operação existe um conjunto de equações dinâmicas responsáveis pela animação das partes girantes e dos mecanismos de controle da turbina, que normalmente não têm sido consideradas para fins de implementação em sistemas de RV.

Propõe-se nesta dissertação a implementação desta modelagem e, para fins de simulação dinâmica, a usina será representada por um equivalente dinâmico entre as várias unidades geradoras que compõem a mesma.

Os estudos foram desenvolvidos considerando um sistema elétrico simplificado, do tipo máquina síncrona - barramento infinito, contemplando um gerador interconectado por um transformador a duas linhas de transmissão em paralelo, conectadas diretamente à barra infinita. A topologia da rede adotada, representando a usina interligada a um barramento infinito, é mostrada na Figura 4.1, conforme KUNDUR (1994).

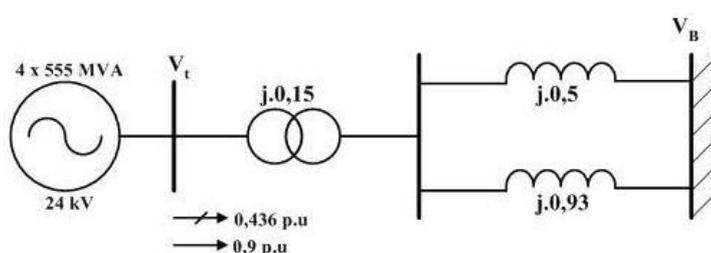


Figura 4.1 – Topologia da rede.

A escolha pela representação de uma unidade hidrogeradora conectada a um barramento infinito deve-se ao fato dos resultados serem bastante representativos daquilo que ocorre na realidade, no interior das estações, sem preocupação com o sistema externo.

O sistema elétrico de potência (SEP) modelado para fins de simulação dinâmica é descrito por um conjunto de equações diferenciais, representando a

dinâmica dos rotores das máquinas síncronas e seus reguladores de velocidade e de tensão, escritas na forma matricial, conforme a Equação (4.1), e um conjunto de equações algébricas dos outros componentes do sistema, tais como: equações algébricas do estator dos geradores, rede de transmissão, transformadores e cargas, representadas através da Equação (4.2).

$$\dot{\bar{x}}(t) = f(\bar{x}(t), \bar{y}(t), \bar{u}(t)) \quad (4.1)$$

$$\bar{y}(t) = g(\bar{x}(t), \bar{u}(t)) \quad (4.2)$$

onde  $\bar{x}(t)$  é o vetor das variáveis de estado,  $\bar{y}(t)$  é o vetor das variáveis de saída e  $\bar{u}(t)$  as variáveis de entrada. A Equação (4.1) depende também das variáveis de saída calculadas na Equação (4.2); isto pode ser justificado lembrando-se que as correntes injetadas são calculadas através das equações da rede, e que os valores dessas correntes são usados no cálculo das tensões internas da máquina, as quais correspondem às variáveis de estado no problema em questão.

Então, as equações algébricas são resolvidas para se obter as tensões e correntes, e os correspondentes fluxos de potência de interesse. Em seguida, as equações diferenciais são resolvidas por um método numérico.

## 4.2 Geradores Elétricos

Os geradores elétricos são conversores rotativos que transformam energia mecânica de rotação em energia elétrica, utilizados em centrais produtoras de eletricidade. Os tipos de geradores elétricos mais adotados na conversão de energia são os geradores síncronos, sendo que estes produzem energia elétrica de corrente alternada com a frequência definida pela rotação a que são submetidos. A energia elétrica no Brasil adota a frequência de 60 Hz.

As máquinas síncronas são caracterizadas por operarem a velocidade constante em situação de regime permanente da máquina, sendo esta velocidade proporcional à frequência das correntes que circulam pelos enrolamentos de armadura. Na velocidade síncrona, o campo magnético girante formado a partir das correntes da armadura caminha à mesma velocidade que o campo criado pela corrente de campo, resultando num conjugado constante. A rotação da máquina

depende de sua forma construtiva, principalmente do número de pólos magnéticos de que é dotada.

As máquinas síncronas apresentam duas partes básicas: o enrolamento de campo, localizado no rotor, e sobre o qual atua o sistema de excitação; e os enrolamentos de armadura, localizados no estator. A máquina síncrona pode tanto operar como gerador, quanto como motor; no entanto, a forma comum de utilização dessa máquina elétrica é no modo de geração. A Figura 4.2 mostra uma estrutura básica de um gerador síncrono.

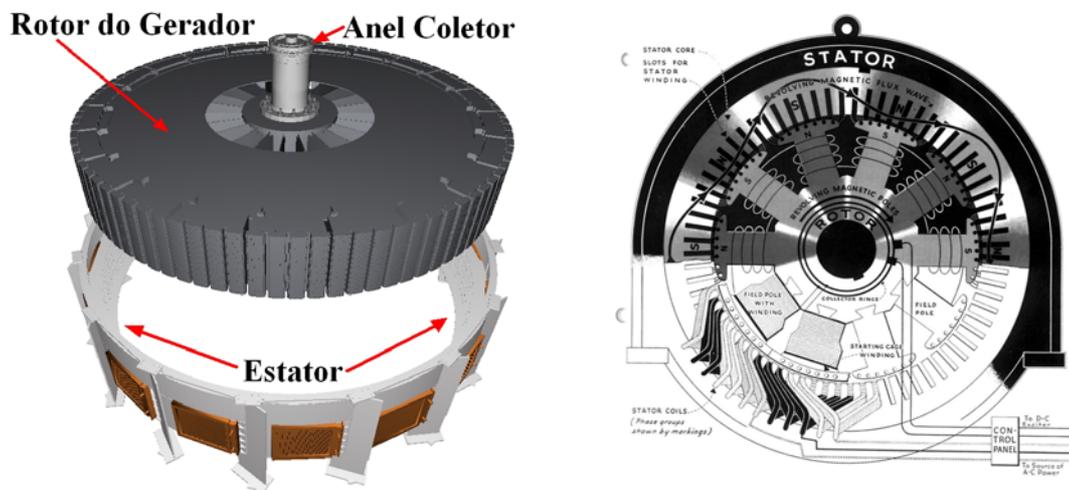


Figura 4.2 – Estrutura física do gerador síncrono.

Além dos enrolamentos de campo e de armadura, a máquina síncrona também apresenta enrolamentos de amortecimento no rotor, com o propósito de atuarem durante a ocorrência de distúrbios na máquina, atenuando os transitórios resultantes.

Os rotores associados às máquinas síncronas podem ser do tipo cilíndrico ou de pólos salientes. Os rotores cilíndricos são mais utilizados em máquinas síncronas que operam com altas velocidades de rotação; os rotores de pólos salientes, por sua vez, estão relacionados com máquinas de baixas velocidades, como no caso dos hidrogeradores e nos sistemas eólicos.

#### 4.2.1 Modelo Dinâmico do Gerador Síncrono

Para a representação do gerador síncrono nos estudos de estabilidade transitória, são desprezados os transitórios do estator. Este procedimento se deve ao fato de que os transitórios eletromagnéticos do estator decaem a uma velocidade bem superior ao do rotor, sendo essencial para compatibilizar a modelagem do gerador com a da rede elétrica. Desta forma, as equações em p.u, na base nominal do gerador, para as tensões atrás da reatância transitória, são mostradas a seguir através do modelo 4 (ARRILAGA & WATSON, 2001):

As equações algébricas, em p.u., associadas ao estator do gerador síncrono, são descritas através das Equações (4.4) e (4.5).

$$E_q'' - v_q = r_a \cdot i_q - x_d'' \cdot i_d \quad (4.4)$$

$$E_d'' - v_d = r_a \cdot i_d + x_q'' \cdot i_q \quad (4.5)$$

Em relação à dinâmica associada ao rotor da máquina, as equações diferenciais em p.u. são dadas pelas Equações (4.6) a (4.10), considerando-se as equações transitórias e subtransitórias de tensão do rotor ao longo dos eixos q e d e a equação de balanço do conjunto turbina-gerador.

$$\frac{dE_q'}{dt} = \frac{1}{T_{d0}'} \cdot [-E_q' + E_{fd} + (x_d - x_d') \cdot i_d] \quad (4.6)$$

$$\frac{dE_q''}{dt} = \frac{1}{T_{d0}''} \cdot [E_q' - E_q'' + (x_d' - x_d'') \cdot i_d] \quad (4.7)$$

$$\frac{dE_d''}{dt} = \frac{1}{T_{q0}''} \cdot [-E_d'' - (x_q - x_q'') \cdot i_q] \quad (4.8)$$

$$\dot{\delta} = 2\pi f_0 \cdot (\omega - \omega_0) \quad (4.9)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2H} \cdot [T_m - T_e + D \cdot (\omega - \omega_0)] \quad (4.10)$$

Onde:

$E_d''$  - Tensão subtransitória do eixo direto;

$E_q''$  - Tensão subtransitória do eixo de quadratura;

$E_q'$  - Tensão transitória do eixo de quadratura;

$E_{fd}$  - Tensão de campo;

$T_{d0}'$  - Constante de tempo transitória no eixo direto;

$T_{d0}''$  - Constante de tempo subtransitória no eixo direto;

$T_{q0}''$  - Constante de tempo subtransitória no eixo de quadratura.

$\delta$  - Ângulo de carga do gerador;

$\omega$  - Freqüência angular do gerador;

$\omega_0$  - Freqüência angular nominal do gerador;

$D$  - Fator de amortecimento;

$H$  - Constante de inércia do gerador;

$T_m$  - Torque mecânico;

$T_e$  - Torque elétrico.

Na Figura 4.3 apresenta-se um diagrama esquemático resumido do modelo transitório do gerador síncrono, conectado a uma rede de transmissão, mostrando o gerador síncrono em conjunto com seus controles, atuando integrado ao Sistema Elétrico de Potência.

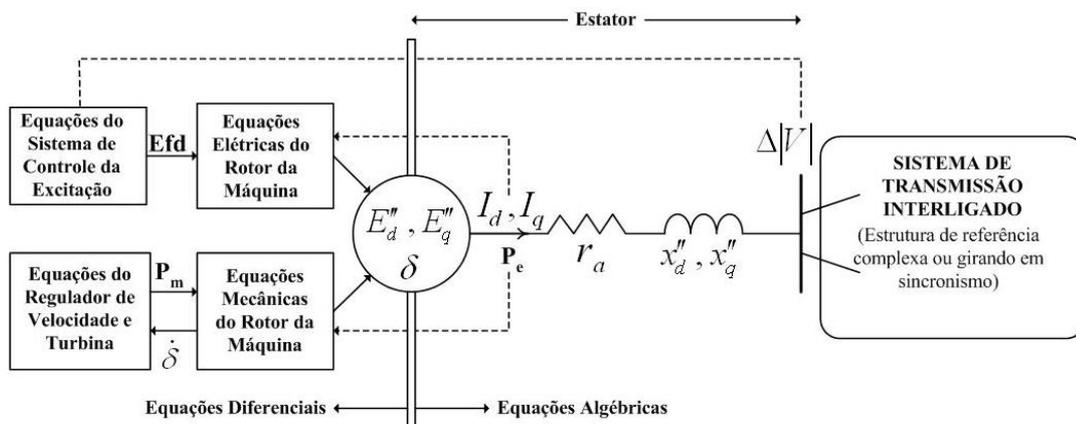


Figura 4.3 – Diagrama esquemático do modelo transitório do gerador síncrono, conectado a uma rede de transmissão.

#### **4.2.2 Controle de Tensão do Gerador**

A utilização dos geradores no controle da tensão em SEP é uma prática de emprego corrente. Ela se traduz na variação da corrente de campo da máquina de modo a manter a sua tensão terminal constante. Trata-se de uma ação de controle local, com limitações impostas pelo enrolamento de campo e pela excitatriz.

O sistema de excitação da máquina síncrona exerce forte influência sobre a estabilidade do SEP (OLIVEIRA, 2006). Portanto, faz-se necessário que tal sistema seja incluído nos modelos adotados para a realização dos estudos propostos.

O objetivo básico do sistema de excitação é fornecer corrente contínua para o enrolamento de campo das máquinas síncronas, regulando a corrente de campo, estes sistemas desempenham funções de controle e proteção essenciais ao desempenho dinâmico satisfatório da rede elétrica (NUNES, 2003).

Um dos componentes principais do sistema de excitação é o Regulador Automático de Tensão (RAT), cuja finalidade é manter o nível de tensão gerada nos valores nominais de operação. O RAT processa e amplifica os sinais de controle de saída em níveis e forma apropriada para a excitatriz. Inclui regulação e funções de estabilização do sistema de excitação (KUNDUR, 1994).

Em alguns casos torna-se necessária a inclusão de sinal adicional estabilizante aplicado no RAT, atuando nas parcelas de torque sincronizante e de amortecimento convenientemente, para garantir um bom desempenho para o sistema. Tal sinal é fornecido pelo Estabilizador de Sistema de Potência (ESP).

O ESP fornece um sinal de saída adicional para o regulador, para amortecer as oscilações do SEP. Os sinais mais utilizados são o desvio de velocidade do rotor, potencia de aceleração e desvio de frequência (KUNDUR, 1994).

#### **4.2.3 Modelo Dinâmico do Regulador de Tensão e ESP**

Para fins de simulação dinâmica, nesta dissertação os modelos utilizados para o RAT e ESP são descritos pelas Figuras 4.4 e 4.5. O modelo do sistema de excitação considerado é mostrado na Figura 4.4. Este modelo representa um sistema de excitação tipo ST1A com RAT (KUNDUR, 1994).

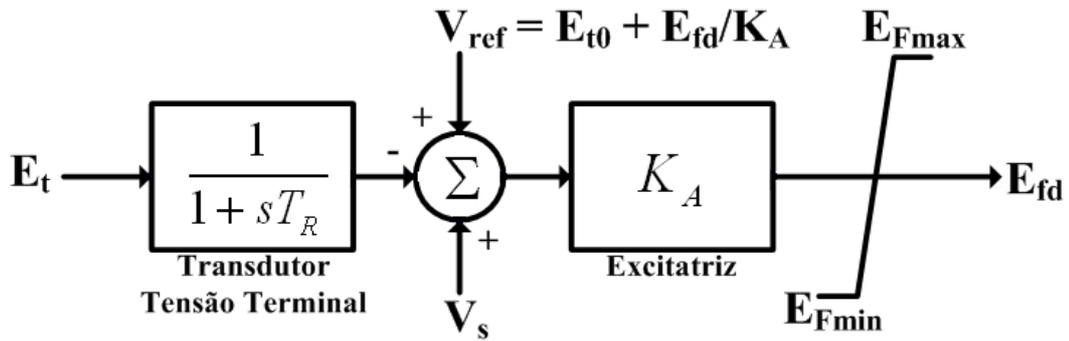


Figura 4.4 – Modelo do sistema de excitação ST1A.

O modelo do ESP é descrito pela Figura 4.5. Este consiste de três blocos: um compensador de fase, um bloco de sinal “washout” e bloco de ganho.

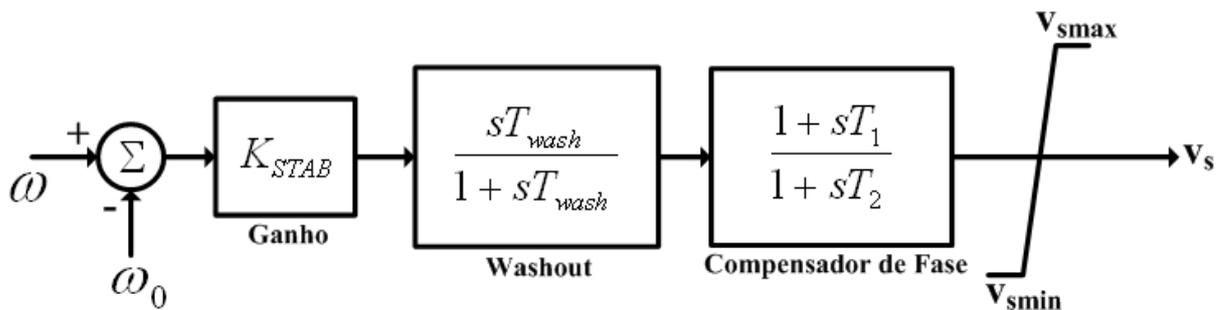


Figura 4.5 – Modelo do Estabilizador do Sistema de Potência

O bloco de compensação de fase fornece uma característica apropriada de avanço de fase, de forma a compensar o atraso de fase entre a entrada da excitatriz e o torque elétrico do gerador.

O bloco de sinal “washout” serve como um filtro passa-altas, com uma constante de tempo  $T_{wash}$  alta o bastante para permitir que sinais associados com oscilações na frequência passem sem alterações. Sem isto, mudanças constantes na velocidade modificariam a tensão terminal.

O ganho de estabilizador  $K_{STAB}$  determina a quantidade de amortecimento introduzida pelo ESP.

### 4.3 Controle de velocidade da turbina hidráulica

O sistema de regulação é o elemento chave do sistema de controle carga-frequência. Consiste de equipamentos de controle e atuação para regular o fluxo de

água através da turbina, para partida e parada da unidade, e regulação da frequência e potência de saída do gerador.

As centrais elétricas necessitam, primordialmente, manter a frequência de rotação de suas máquinas por diversos motivos. O primeiro, e que logo se destaca, é a necessidade de se gerar energia elétrica com características técnicas aceitáveis, ou seja, com uma frequência-padrão ( $\pm 1\%$  de variação). O segundo é de ordem mecânica, pois a máquina foi projetada para um rendimento ótimo naquela rotação, além dos componentes serem calculados para suportar os esforços naquela condição (SOUZA *et al.*, 1983).

Durante a operação da turbina, o controle primário de velocidade, basicamente monitora a velocidade do eixo do conjunto turbina-gerador e controla o torque mecânico da turbina, de modo a fazer com que a potência elétrica gerada pela unidade se adapte às variações de carga.

O controle de velocidade (e potência) nas turbinas Francis é realizado pelo posicionamento das pás diretrizes, as quais são acionadas pelo anel distribuidor (anel de regulação). Atuadores de potência hidráulica que convertem o sinal de controle do regulador em movimento mecânico do distribuidor são utilizados nesse processo.

#### **4.3.1 Descritivo Funcional de Regulação – Sistema Mecânico-Hidráulico**

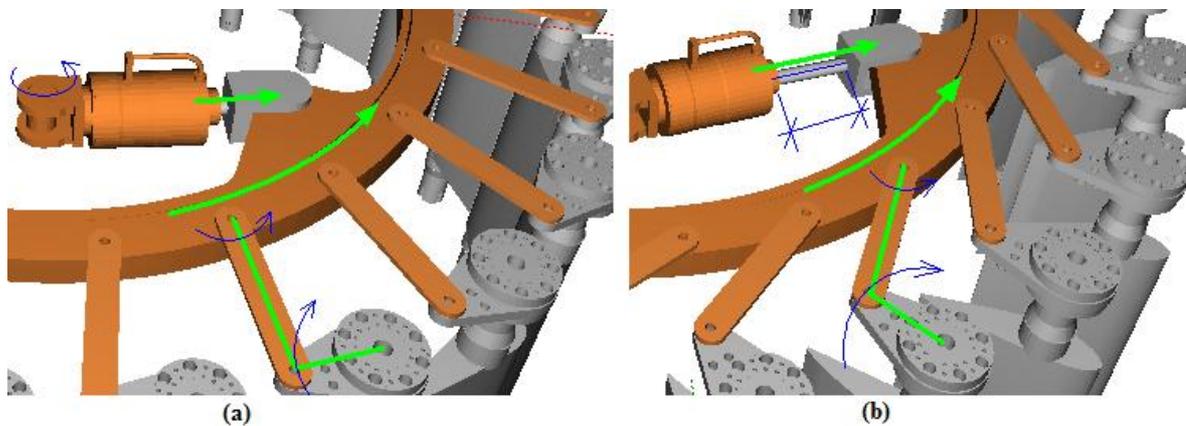
O distribuidor é manobrado por quatro servomotores de duplo-efeito. Cada diretriz é manobrada por um sistema biela-manivela e alavanca. A alavanca é pinada à diretriz por meio de 4 pinos providos de buchas cônicas. A ligação com a manivela é realizada através do pino de ruptura. Este mecanismo de regulação compreende essencialmente:

- Um jogo de 24 manivelas em aço, montadas na parte superior das alavancas das diretrizes.
- Um jogo de 24 alavancas das diretrizes fundidas, montadas no eixo superior das diretrizes e conectadas às manivelas através dos pinos de ruptura.
- Um jogo de 24 bielas em aço carbono pinadas ao anel de regulação e às alavancas.

- Um anel de regulação em uma única peça.

As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam o mecanismo de abertura e fechamento do distribuidor, sendo que na Figura 4.7 apresenta-se a interface dos atuadores de potência hidráulica, a qual fornece óleo pressurizado para o movimento dos pistões de cada servomotor, utilizados na manobra do distribuidor interligado à turbina hidráulica Francis.

Na Figura 4.6 tem-se um esquema resumido dos atuadores de potência hidráulicos, utilizado na manobra das diretrizes do distribuidor.



**Figura 4.6 – Esquema de abertura e fechamento do distribuidor: (a) totalmente fechado, (b) totalmente aberto.**

Na Figura 4.7 é apresentado um esquema resumido do sistema hidráulico responsável por converter o sinal do regulador de velocidade em movimentos mecânicos do distribuidor. Um sistema de motobombas coloca em serviço o enchimento da cuba de óleo. Estando o acumulador ar/óleo em condições normais de operação, com pressão do óleo estabelecida e detectada pelo pressostato, a unidade hidráulica de regulação estará pronta para entrar em operação, atuando no movimento dos pistões de cada servomotor.

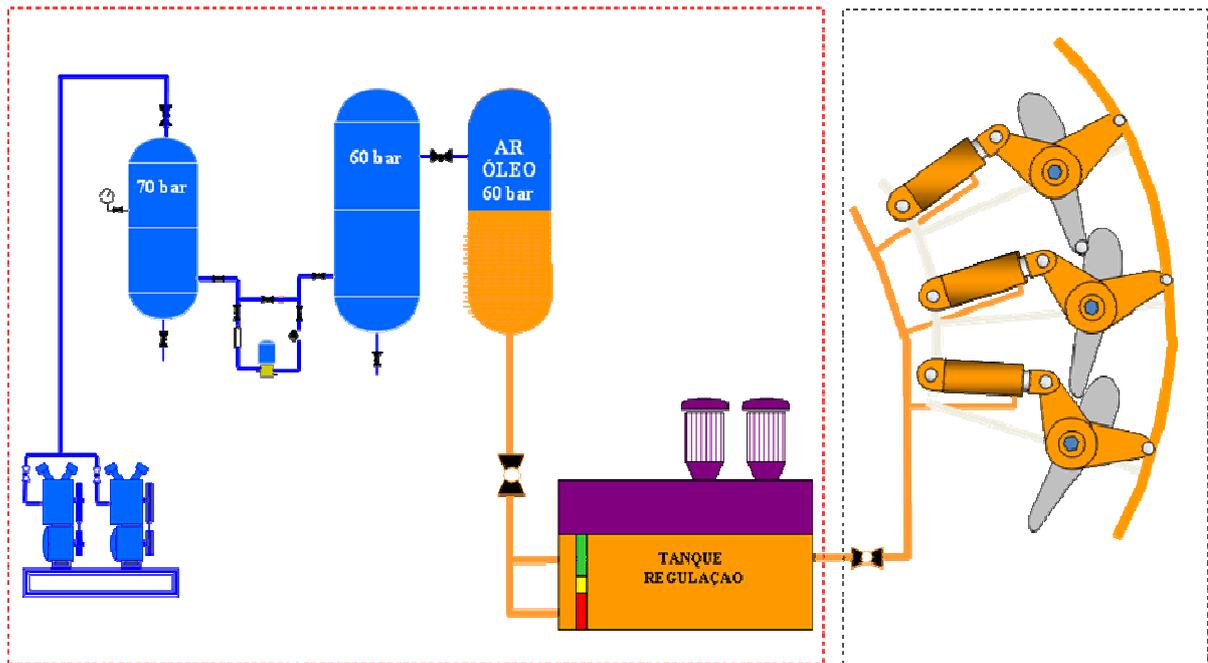


Figura 4.7 – Sistema mecânico hidráulico do Regulador de Velocidade da Turbina.

#### 4.3.2 Comando das Palhetas Distribuidoras

O sistema hidráulico típico de um regulador de velocidade para uma turbina Francis apresenta um circuito hidráulico com atuadores e sensores para o movimento do distribuidor.

Para o sistema de regulação da UHE de Tucuruí, tal sistema compreende basicamente cinco componentes hidráulicos principais que operam interligados, quais sejam: **válvula atuadora**, **válvula distribuidora principal**, **eletro-válvula de segurança**, **válvula hidráulica pilotada** e **servomotores** (atuador hidráulico do distribuidor), conforme mostra a Figura 4.8.

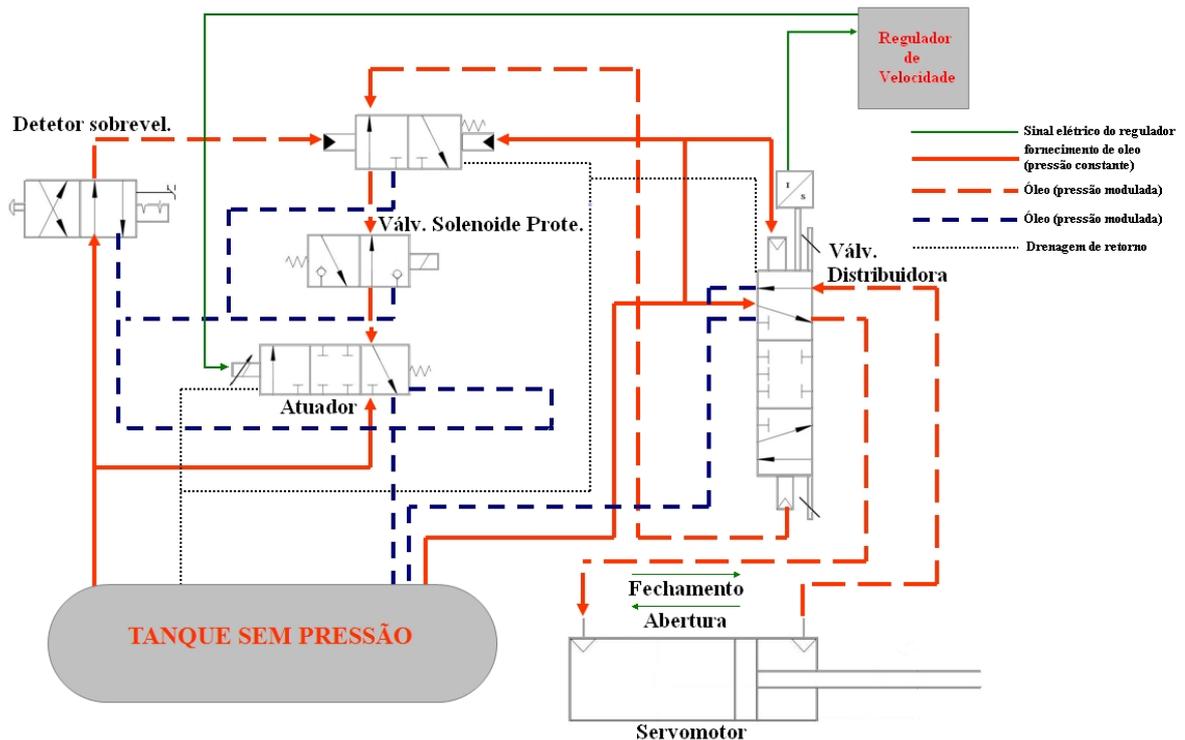


Figura 4.8 – Esquema hidráulico de comando do distribuidor

A **válvula atuadora** (modulada eletricamente pelo sinal de controle do regulador) pilota a **válvula distribuidora principal** em torno de uma posição de equilíbrio. O deslocamento do êmbolo para cima provoca a admissão de óleo dentro das câmaras de abertura dos servomotores do distribuidor e coloca em evacuação as câmaras de fechamento dos servomotores do distribuidor.

O êmbolo da **válvula distribuidora principal** é deslocado como um servomotor de pressão diferencial, onde a câmara superior é alimentada com pressão constante de regulação e a câmara inferior é alimentada com pressão modulada pela **válvula atuadora** por intermédio de uma tubulação na qual são intercaladas a **eletro-válvula de segurança** e a **válvula hidráulica pilotada**.

Em operação normal, a **eletroválvula** e a **válvula hidráulica pilotada** asseguram uma comunicação direta entre a **válvula atuadora** e a câmara inferior da **válvula distribuidora principal**.

Quando ocorre o corte de alimentação elétrica da **eletro-válvula**, ou quando o dispositivo de sobrevelocidade é acionado, a pressão de regulação permanece na câmara superior da **válvula distribuidora principal**, fazendo descer o êmbolo desta, provocando o fechamento do distribuidor, pela admissão do óleo dentro do cilindro de fechamento do mesmo e a evacuação do óleo do cilindro de abertura.

### 4.3.3 Modelo Dinâmico do Regulador de Velocidade

Os diagramas de bloco do modelo do regulador de velocidade da UHE Tucuruí e da Turbina são apresentados nas Figuras 4.9 e 4.10 (OLIVEIRA, *et al.*, 2005), com os parâmetros descritos na Tabela 4.1. Utilizando-se tal modelo, implementou-se a simulação eletromecânica da usina.

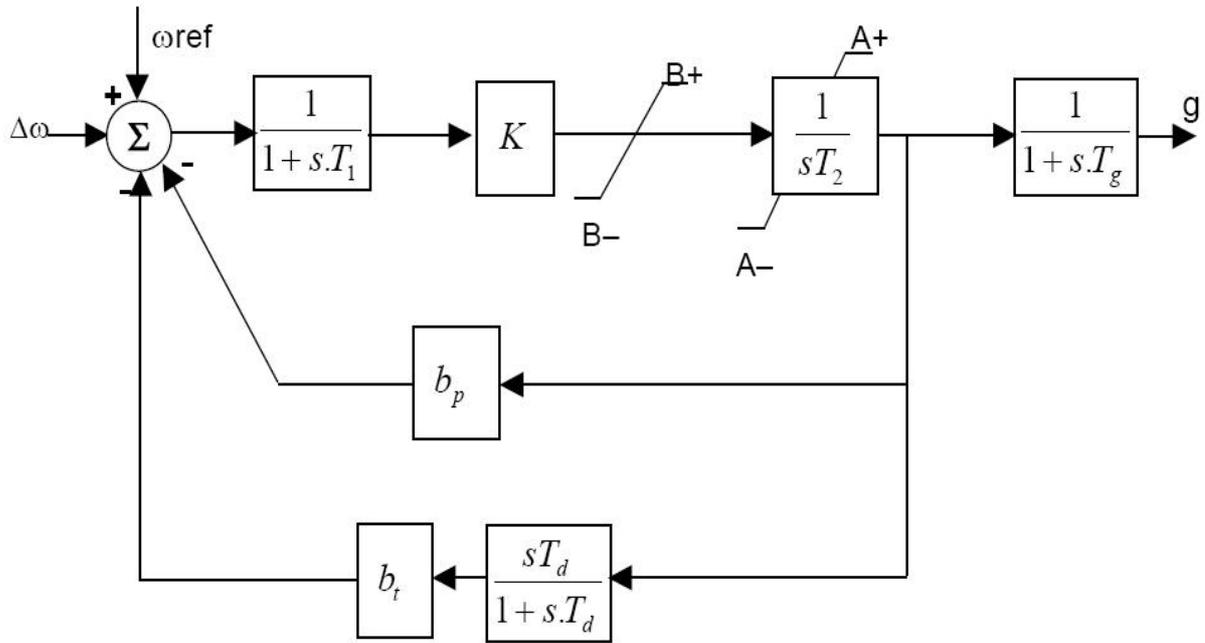


Figura 4.9 – Modelo do regulador de velocidade.

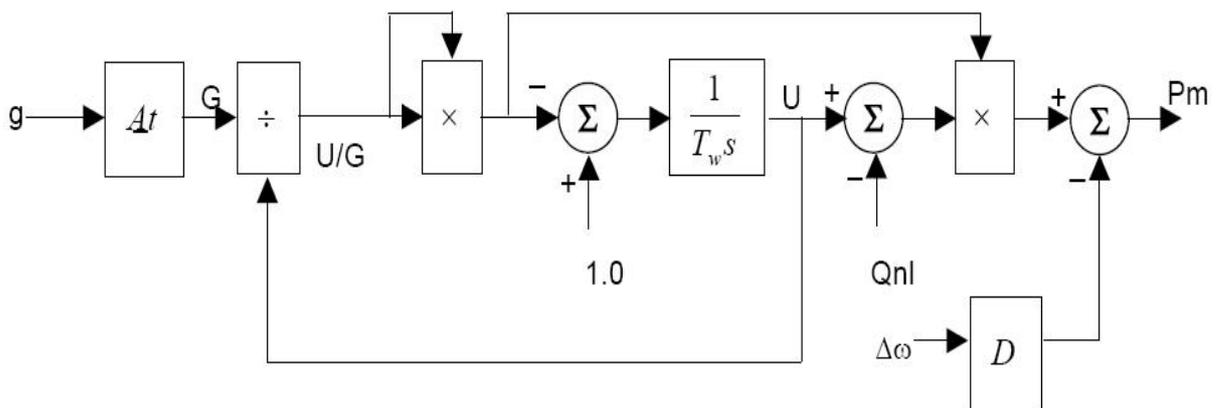


Figura 4.10 – Modelo da turbina hidráulica.

Tabela 4.1 – Parâmetros da turbina e regulador de velocidade.

Parâmetros	Valor	Descrição
T1	0,036s	Constante de Tempo da Válvula Distribuidora
K	10,0 pu/pu	Ganho da Válvula Distribuidora
T2	0,909pu/pu	Constante de Tempo do Servo Motor Principal
bp	0,05pu/pu	Estatismo Permanente
bt	0,4pu/pu	Estatismo Transitório
Td	6s	Constante de Tempo do Estatismo Transitório
Tg	1,0s	Constante de Tempo do Servomotor
B+	0,0515pu/s	Velocidade de Abertura
B-	-0,17pu/s	Velocidade de Fechamento
A+	1,0pu/s	Posição Máxima do Gate
A-	0,005pu/s	Posição Mínima do Gate
At	1,2pu/pu	Ganho da Turbina
Tw	1,2s	Constante de Tempo de aceleração da água no condutor
Qnl	0,13 pu	Abertura do distribuidor com a unidade a vazio
D	1,0pu/pu	Amortecimento da Turbina

#### 4.4 Modelagem das Articulações do Sistema Distribuidor da Turbina

A navegação no mundo virtual depende de uma série de fatores, uma vez que a mesma envolve dispositivos não convencionais de entrada/saída e é realizada em tempo real.

No mundo virtual, assim como no mundo real, a navegação acontece no espaço tridimensional, sendo resultante da combinação de movimentos de translação e de rotação, reproduzindo, por exemplo, os movimentos de um avião. Assim, pode-se deslocar nos três eixos cartesianos **X**, **Y** e **Z** e também rotacionar em torno deles. Isto resulta no que se chama de 6 graus de liberdade (3 de translação e 3 de rotação), conforme apresenta a Figura 4.11.

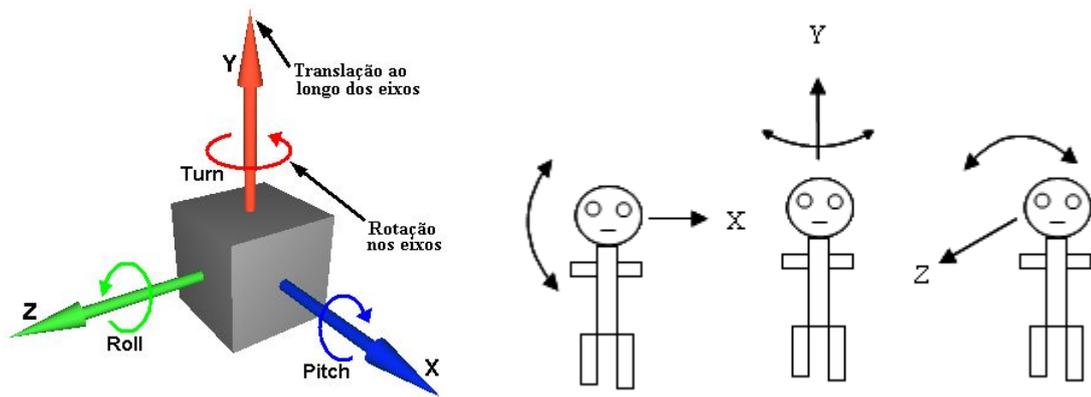


Figura 4.11 – Navegação mostrando os 6 graus de liberdade possíveis.

Para fins de animação e movimentação das articulações e peças, foi desenvolvida e implementada, na presente dissertação, a modelagem, com base em geometria analítica, para o grau de liberdade das peças no espaço 3D do universo virtual. Estes movimentos no mundo virtual reproduzem os movimentos das peças do distribuidor, de tal forma como acontece para um sistema real.

Na Figura 4.12 tem-se um diagrama esquemático com o lugar geométrico da posição de cada ponto de coordenada, para cada peça do distribuidor a ser movimentada no mundo virtual. Tais coordenadas são descritas pelos pontos  $P_a$ ,  $P_b$ ,  $P_1$  e  $P_2$ .

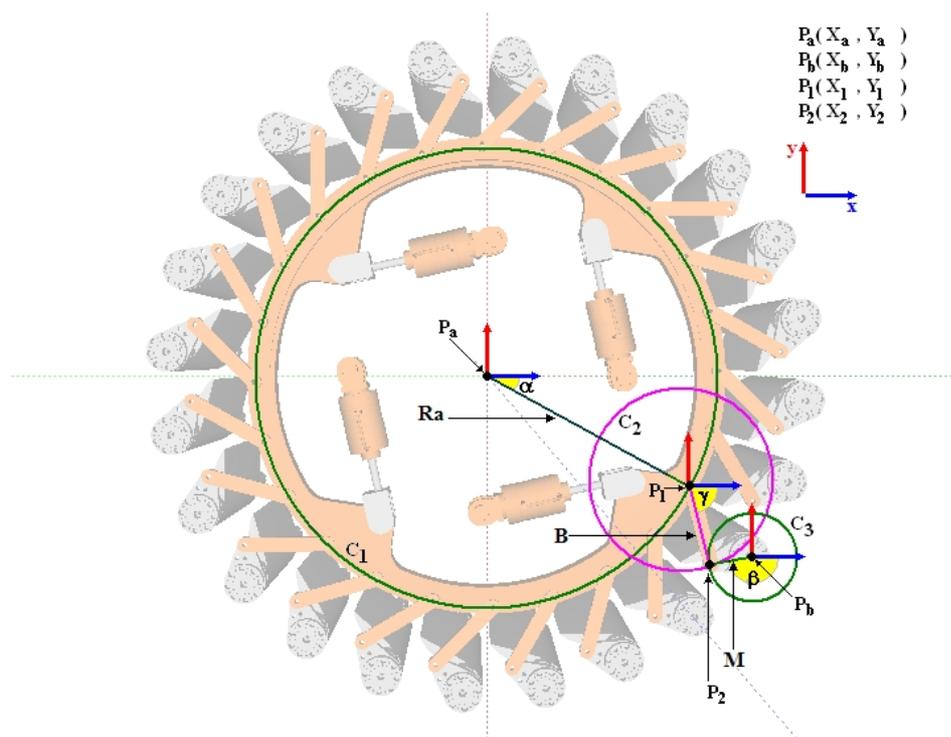


Figura 4.12 – Lugar geométrico para o movimento das peças articuladas do distribuidor.

O ponto  $P_1$  descreve o ponto de coordenada para a junção entre o anel de regulação e a biela. Esta descreve um movimento de giro em torno do eixo  $Z$ , através do ângulo  $\gamma$ . As posições possíveis para o ponto  $P_1$ , no plano  $XY$ , são descritas pela circunferência  $C_1$ , dada pela Equação (4.11), a qual acompanha o ângulo de giro  $\alpha$  do anel de regulação, posicionado no ponto  $P_a$ , sendo regido pela seguinte equação:

$$(X_1 - X_a)^2 + (Y_1 - Y_a)^2 = R_a^2 \quad (4.11)$$

O conjunto formado pela palheta diretriz e manivela possui um mesmo eixo de giro  $Z$ , no ponto de coordenada  $P_b$ , com um ângulo de giro  $\beta$ .

O ponto de junção entre a manivela e a biela,  $P_2$ , é dado pela interseção entre as circunferências dadas pelas Equações (4.12) e (4.13), escritas a seguir:

$$X_2^2 + Y_2^2 + a_1 \cdot X_2 + b_1 \cdot Y_2 + c_1 = 0 \quad (4.12)$$

$$X_2^2 + Y_2^2 + a_2 \cdot X_2 + b_2 \cdot Y_2 + c_2 = 0 \quad (4.13)$$

onde:

$$a_1 = -2 \cdot X_1 \quad (4.14)$$

$$a_2 = -2 \cdot X_b \quad (4.15)$$

$$b_1 = -2 \cdot Y_1 \quad (4.16)$$

$$b_2 = -2 \cdot Y_b \quad (4.17)$$

$$c_1 = X_1^2 + Y_1^2 - B^2 \quad (4.18)$$

$$c_2 = X_b^2 + Y_b^2 - M^2 \quad (4.19)$$

Igualando-se as Equações (4.12) e (4.13), obtém-se a Equação (4.20):

$$Y_2 = \frac{(a_1 - a_2)}{(b_2 - b_1)} \cdot X_2 + \frac{(c_1 - c_2)}{(b_2 - b_1)} \quad (4.20)$$

Substituindo-se a Equação (4.20) na Equação (4.12), obtém-se a Equação (4.21) a seguir:

$$a \cdot X_2^2 + b \cdot X_2 + c = 0 \quad (4.21)$$

sendo,

$$a = 1 + \left( \frac{a_1 - a_2}{b_2 - b_1} \right)^2 \quad (4.22)$$

$$b = \frac{a_2 \cdot (b_2 - b_1)^2 + (a_1 - a_2) \cdot [b_2 \cdot (b_2 - b_1) + 2 \cdot (c_1 - c_2)]}{(b_2 - b_1)^2} \quad (4.23)$$

$$c = \frac{(c_1 - c_2)^2 + c_2 \cdot (b_2 - b_1)^2 + b_2 \cdot (c_1 - c_2) \cdot (b_2 - b_1)}{(b_2 - b_1)^2} \quad (4.24)$$

Resolvendo-se a Equação (4.21) através da Equação (4.25), tem-se o ponto de coordenada  $P_2$ . Portanto, com esses valores é possível obter  $\gamma$  e  $\beta$ , que correspondem aos ângulos de giro da biela e da manivela em torno do eixo  $\mathbf{Z}$ , através das Equações (4.26) e (4.27), dadas a seguir.

$$X_2 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a} \quad (4.25)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left( \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \right) \quad (4.26)$$

$$\beta = 180^\circ - \tan^{-1} \left( \frac{Y_2 - Y_b}{X_2 - X_b} \right) \quad (4.27)$$

Para a ferramenta computacional do presente trabalho, a qual foi implementada na modelagem do ambiente virtual, cada objeto visual em tal ambiente apresenta um conjunto individual de 3 eixos de coordenada, sendo que cada objeto pode rotacionar em torno de cada eixo de coordenadas.

Na Figura 4.13 tem-se as peças principais do distribuidor, utilizadas no controle da velocidade da turbina, tais como biela, manivela, palheta diretriz, anel de regulação e servomotor.

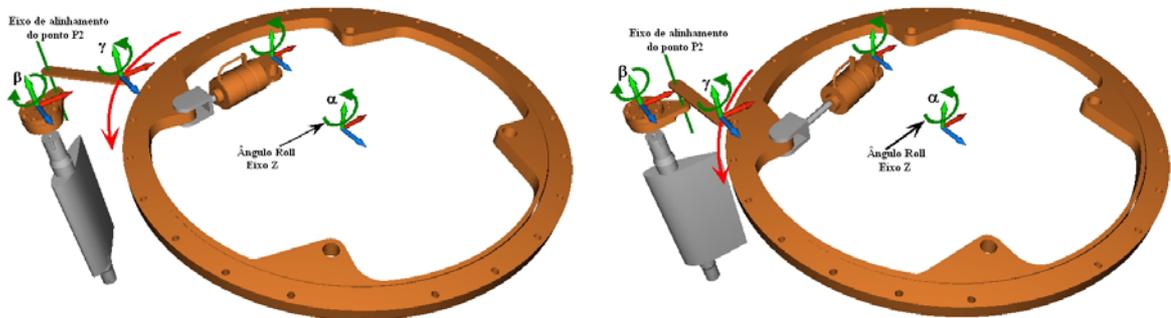


Figura 4.13 – Ângulo de rotação para cada peça articulada do distribuidor.

De uma forma ilustrativa, nota-se, através da Figura 4.12, que cada peça possui um sistema de eixos de coordenadas, sendo que o mesmo controla os movimentos de rotação e translação de cada peça do ambiente virtual.

Associado a cada eixo de coordenadas, existem ângulos de rotação em torno destes, definidos como: **Pitch** (eixo **X**), **Turn** (eixo **Y**) e **Roll** (eixo **Z**).

Estes ângulos são definidos pela biblioteca gráfica da ferramenta computacional utilizada no presente trabalho durante a modelagem do ambiente virtual.

Os ângulos calculados através das Equações (4.26) e (4.27) definem o movimento rotacional da biela e da manivela em torno do eixo **Z** (**Roll**), possuindo um valor máximo e um mínimo. Estes valores estão relacionados aos valores máximo e mínimo de abertura do distribuidor através da grandeza **g**, conforme o modelo dinâmico apresentado na Figura 4.9, sendo o máximo definido como 1(um) e o mínimo como 0 (zero).

#### **4.5 Considerações Finais**

Para fins de animação gráfica do distribuidor da turbina, este capítulo abordou a modelagem dinâmica da UHE, proposta na simulação das partes eletromecânicas da usina abordada nesta dissertação.

Além da descrição das equações utilizadas nos modelos dos diversos componentes da UHE, este capítulo aborda alguns aspectos construtivos que foram desenvolvidos para o sistema de regulação de velocidade das turbinas de Tucuruí.

Foi também abordada a metodologia utilizada para a movimentação das articulações e peças do distribuidor da turbina, no ambiente virtual, da mesma forma como acontece para um sistema real.

## CAPÍTULO 5 – ESTRUTURA COMPUTACIONAL DA UHE VIRTUAL

### 5.1 Introdução

Este capítulo visa abordar a estrutura computacional de uma Unidade Hidrogeradora Virtual (UHV), que reproduz as características e comportamento de uma UHE real. Para tanto, utilizou-se a arquitetura da UHE, descrita no capítulo anterior, como estudo de caso na implementação da UHV. O detalhamento do funcionamento e características do sistema é abordado de forma limitada, dando um enfoque maior para as funcionalidades do Módulo de Operação, um sub-ítem do sistema que simula uma UHE integrada ao Sistema Elétrico de Potência (SEP).

### 5.2 Implementação Computacional

O sistema foi todo implementado usando o ambiente de desenvolvimento *Delphi*, na versão 7. Tal ambiente possui uma IDE “*Integrated Development Environment*”, visual o que simplifica a visualização do resultado obtido ainda em tempo de projeto. Além disso, a linguagem utilizada é o *Object Pascal*, que corresponde a uma linguagem já fundamentada, estando em sua sétima versão e orientada a objetos, e os componentes Open Source GLScene, os quais correspondem a uma biblioteca 3D baseada na API “*Application Programming Interface*” OpenGL para a linguagem Object Pascal, a qual fornece componentes visuais e objetos, permitindo a descrição (grafo de cena) e renderização das cenas 3D. O GLScene, além de ser um envoltório de OpenGL, é também um conjunto de classes fundamentado no desenvolvimento rápido da aplicação. Este permite que se projete e renderize rapidamente as cenas 3D sem ter que aprender todas as particularidades da OpenGL.

A modelagem eletromecânica da dinâmica da UHE foi implementada na linguagem *Object Pascal*. A interação entre os módulos da modelagem dinâmica e o ambiente virtual 3D é responsável por toda a dinâmica e por todo o realismo do sistema, pois os primeiros resolvem as equações do gerador e da turbina Francis, a

cada amostra (interação), e repassam os valores das variáveis para as animações no Ambiente Virtual 3D, fazendo com que este se comporte como uma UHE real.

O sistema de hardware utilizado foi um microcomputador com processador Pentium IV de 3.0 MHz, 4 GB de memória RAM e com uma placa de vídeo Quadro FX 1100.

### **5.3 Modelagem 3D**

Uma UHE é composta de dezenas de milhares de peças, desde parafusos com alguns milímetros até rotores pesando centenas de toneladas. Para realizar a modelagem dessas peças foram fornecidos pela Eletronorte manuais impressos e desenhos 2D em AutoCAD das partes da UHE e suas peças constituintes. Esses desenhos serviram de base para a produção dos modelos tridimensionais das peças. A construção dos modelos foi realizada em duas etapas. Primeiro, os modelos bidimensionais das plantas que possuíam representação no AutoCAD foram recriados tridimensionalmente, usando essa mesma ferramenta. Depois desse passo, os modelos foram exportados para o 3D Studio, que é uma ferramenta voltada à criação de modelos para computação gráfica e que possui um formato de exportação de dados considerado padrão para exportação de modelos tridimensionais, cuja extensão é 3DS. Cada uma das peças foi subdividida em suas partes constituintes e essas novamente, até se chegar à menor peça modelável de cada parte da UHE. A própria constituição das peças da UHE implica em uma estrutura hierárquica, onde cada uma das peças está ligada a outras construindo peças maiores, que por sua vez, estão ligadas novamente, constituindo novas peças e assim por diante até chegar a toda a UHE. A Figura 5.1 mostra uma parte da hierarquia construída durante a modelagem das peças, desde a UHE até o sistema de acionamento.

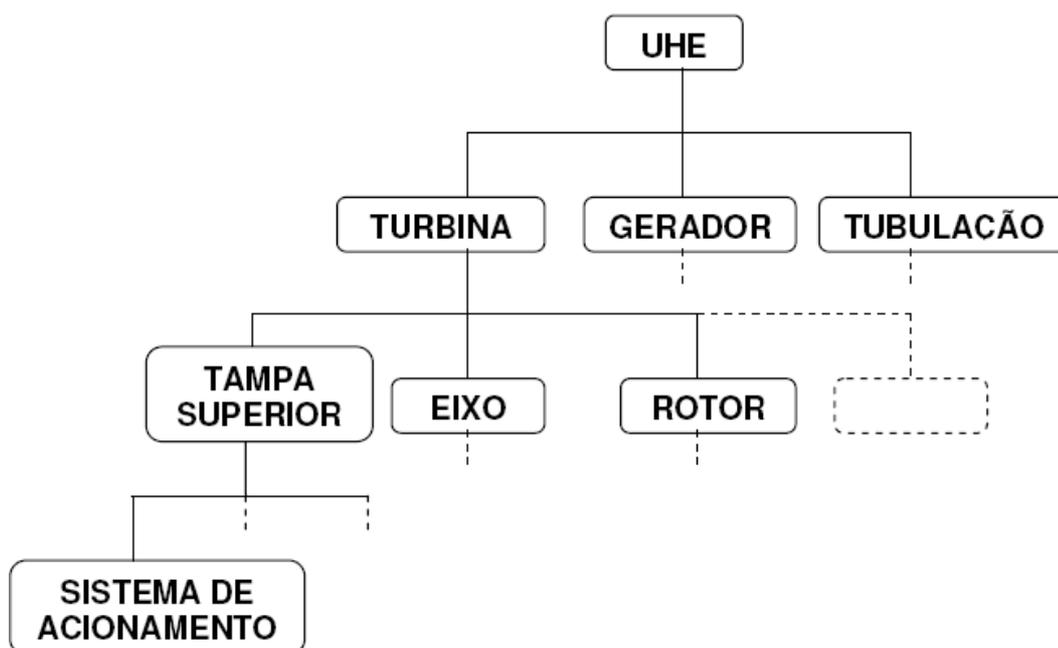


Figura 5.1 – Árvore de peças da UHG

#### 5.4 Arquitetura do Sistema

A Figura 5.2 mostra o interrelacionamento das principais funcionalidades do sistema. A fronteira pontilhada realça o núcleo do sistema, destacando que este é independente dos dados acessados e da plataforma de exibição. A seguir apresenta-se a descrição de cada uma das principais funcionalidades do diagrama.

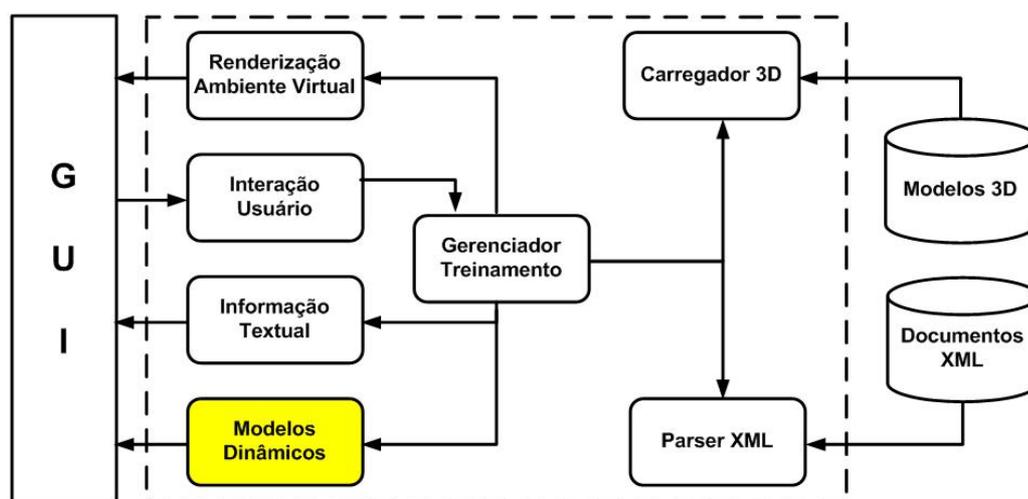


Figura 5.2 – Diagrama com as principais funcionalidades internas do sistema.

- O *Gerenciador de Treinamento* é o responsável por coordenar as demais funções, visando acompanhar o desempenho do treinando no decorrer do treinamento. A partir do gerenciador de treinamento, o treinando escolhe que tipo de treinamento irá realizar, educativo ou manutenção, e o gerenciador aciona as funções apropriadas para realizá-lo.
- Os documentos XML guardam as informações sobre os modelos 3D (nome, descrição, dados físicos, posicionamento no ambiente, entre outras). E sobre os treinamentos (seqüência de passos, peças que devem ser manipuladas, etc.).
- O *Carregador* ou *Loader* 3D responde pelo carregamento em memória dos modelos 3D (peças mecânicas), utilizados na construção do mundo virtual. Estes modelos foram criados no 3D Studio a partir de plantas da usina hidrelétrica e são carregados no grafo de cena.
- O *Renderizador* é responsável pela exibição do ambiente virtual ao treinando, ou seja, gerenciamento da visualização das peças e do observador, suas manipulações e posicionamentos.
- *Informação Textual* é responsável por exibir ao treinando informações sobre a peça em estudo. As informações exibidas são dinâmicas e dependem de vários fatores, como o conteúdo do ambiente virtual, natureza do treinamento, nível de detalhamento da peça, grau de conhecimento do treinando e ação executada. Esta funcionalidade também gerencia as respostas que são dadas ao treinando.
- A *interação do usuário* compreende os dispositivos e drivers responsáveis por interpretar os estímulos externos do treinando. Estes estímulos são realizados hoje através do mouse e teclado, que representam a intenção e a ação que o treinando deseja tomar durante determinada parte do treinamento.

- Os *modelos dinâmicos* são responsáveis por resolver numericamente a interação eletromecânica da UHE, e a partir desses resultados, interagirem com o ambiente virtual através das grandezas mecânicas utilizadas na animação desta.

## **5.5 O Uso de Técnica de Modelagem Orientada a Objetos como Ferramenta de Desenvolvimento**

As técnicas de projeto de software baseadas no paradigma da Modelagem Orientada a Objetos (MOO) procuram modelar um sistema físico real no âmbito computacional em que se vai estudar o sistema, representando-se internamente no software as características estáticas e dinâmicas dos elementos do mundo real. Esta representação deve ser o mais fielmente possível, para facilitar o entendimento do projeto (AGOSTINI, 2002).

Diante deste contexto, ressalta-se a importância MOO aplicada ao sistema proposto, no desenvolvimento da presente dissertação. Esta técnica torna o sistema facilmente depurado, de fácil manutenção e entendimento. Novas classes podem ser integradas dentro do mesmo para suportar novas funcionalidades.

Para manter o controle do processo de desenvolvimento e ainda utilizar as técnicas de Engenharia de Software, utilizou-se o desenvolvimento orientado a objetos (PRESSMAN, 1995).

A engenharia de software é a parte da informática voltada para a especificação, desenvolvimento e manutenção de sistemas de software. Seu fundamento apóia-se no uso de modelos abstratos e precisos que representam, em alto nível, o sistema em questão. A metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho foi o Processo Unificado (PU) (JACOBSON 1998), que corresponde a um processo iterativo e incremental apoiado em fases e diagramas, tais como a Linguagem de Modelagem Unificada (UML) (BOOCH *et al.*, 1999).

O processo de desenvolvimento do software unificado é um padrão industrial de engenharia de produção de softwares e foi formulado pelos mesmos criadores da UML "*Unified Modeling Language*" (BOOCH *et al.*, 1999).

Segundo BOOCH *et al.* (1999), a UML suporta as cinco fases de desenvolvimento de Software, onde estas não necessariamente devem ser executadas na ordem seqüencial. Tais fases são:

- **Análise de Requisitos** – Nesta fase são capturadas as necessidades dos usuários e o comportamento do sistema através de análise de casos de uso, chamados “*Use Case*”. A UML utiliza-se de diagrama do “*Use-Cases*” na modelagem, sendo este utilizado para se identificar como o sistema se comporta em várias situações que podem ocorrer durante sua operação;
- **Análise** – Nesta fase são identificadas as classes, objetos e os mecanismos que estarão presentes no domínio do problema. As classes são modeladas e interligadas através de relacionamentos, utilizando o Diagrama de Classes. Na análise, só serão modeladas classes que pertençam ao domínio do problema. Classes que gerenciem banco de dados, comunicação, interface e outros não estarão presentes neste diagrama;
- **Projeto** – Os resultados da análise são expandidos nesta fase em soluções técnicas. Novas classes serão adicionadas para prover uma infra-estrutura técnica, a qual seja composta da interface do usuário e de periféricos, o gerenciamento de banco de dados, comunicação com outros sistemas, entre outros. As classes do domínio do problema, modeladas na fase de análise, são mescladas nessa nova infra-estrutura, tornando possível alterar tanto o domínio do problema, quanto a infra-estrutura do mesmo. O design resulta no detalhamento das especificações para a fase seguinte;
- **Implementação** – As classes são convertidas para código real em uma linguagem Orientada a Objetos. No caso do trabalho proposto, utilizou-se a linguagem Object Pascal;
- **Testes** – Idêntico a qualquer outro método de modelagem. Dividida em testes de unidades, testes de integração, teste de sistema e testes de aceitação.

Na MOO, a classe é definida como um grupo de objetos com atributos, comportamentos, relacionamentos com outros objetos e semântica comuns. Uma classe é uma abstração que enfatiza características relevantes dos objetos, suprimindo outras características. Portanto um objeto é sempre uma instância de uma classe.

As classes possuem duas características principais:

- **Atributo:** Um atributo representa uma propriedade que todos os objetos da classe têm, mas cada objeto terá valores particulares para seus atributos.
- **Métodos:** São ações que implementam uma operação. Uma classe pode ter qualquer número de métodos e dois métodos em duas classes diferentes podem ter o mesmo nome.

Em UML, a classe é representada por um retângulo, mostrado na Figura 5.3, subdividido em três áreas: A primeira contém o nome da Classe. A segunda contém seus atributos. A terceira contém suas operações ou métodos.

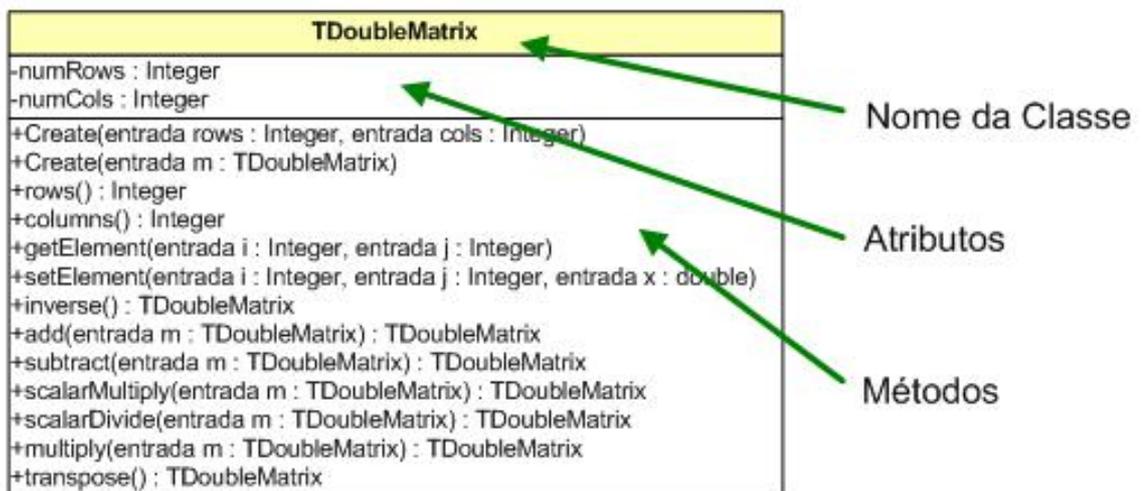


Figura 5.3 – Representação de uma classe em UML

As classes se combinam com outras através de relacionamentos. Os relacionamentos ligam as classes/objetos entre si criando, relações lógicas entre estas entidades. Os relacionamentos podem ser dos seguintes tipos:

- **Associação:** É uma conexão entre classes. Em UML, uma associação é definida como um relacionamento que descreve uma série de ligações. Esta subdivide-se em:
  1. **Agregação** – É o relacionamento chamado todo/parte, onde os objetos partes somente são criados se o todo ao qual estão agregados existir;

2. **Composição** – Relacionamento entre um elemento (o todo) e outros elementos (as partes), onde as parte só podem pertencer ao todo e são criadas e destruídas com ele.
- **Generalização:** Também conhecida como herança, representa as dependências e hierarquias. É um relacionamento de um elemento mais geral com outro mais específico. O elemento mais específico pode conter apenas informações adicionais.
  - **Dependência e Refinamentos:** Dependência é um relacionamento entre elementos, um independente e outro dependente. A dependência entre classes indica que os objetos de uma classe usam serviços dos objetos de outra classe.

A Figura 5.4 mostra a representação gráfica, em UML, associada aos tipos de relacionamentos.

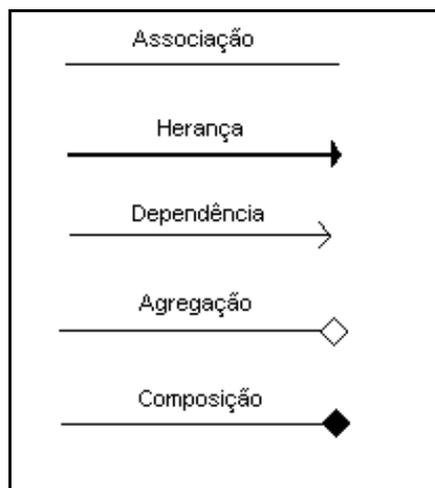


Figura 5.4 – Notação UML para os tipos de relacionamento.

Todos estes relacionamentos são mostrados no diagrama de classes juntamente com as suas estruturas internas, que são os atributos e operações. O diagrama de classes é uma representação da estrutura e relações das classes, que servem de modelo para os objetos. Tal diagrama é considerado estático, já que a estrutura descrita é sempre válida em qualquer ponto do ciclo de vida do sistema.

A Figura 5.5 representa o diagrama de classes do simulador dinâmico da UHE, totalmente desenvolvido nesta dissertação, mostrando suas classes e seus

relacionamentos, ilustrando de forma resumida os principais atributos e métodos das classes, descritos conforme a simbologia da UML.

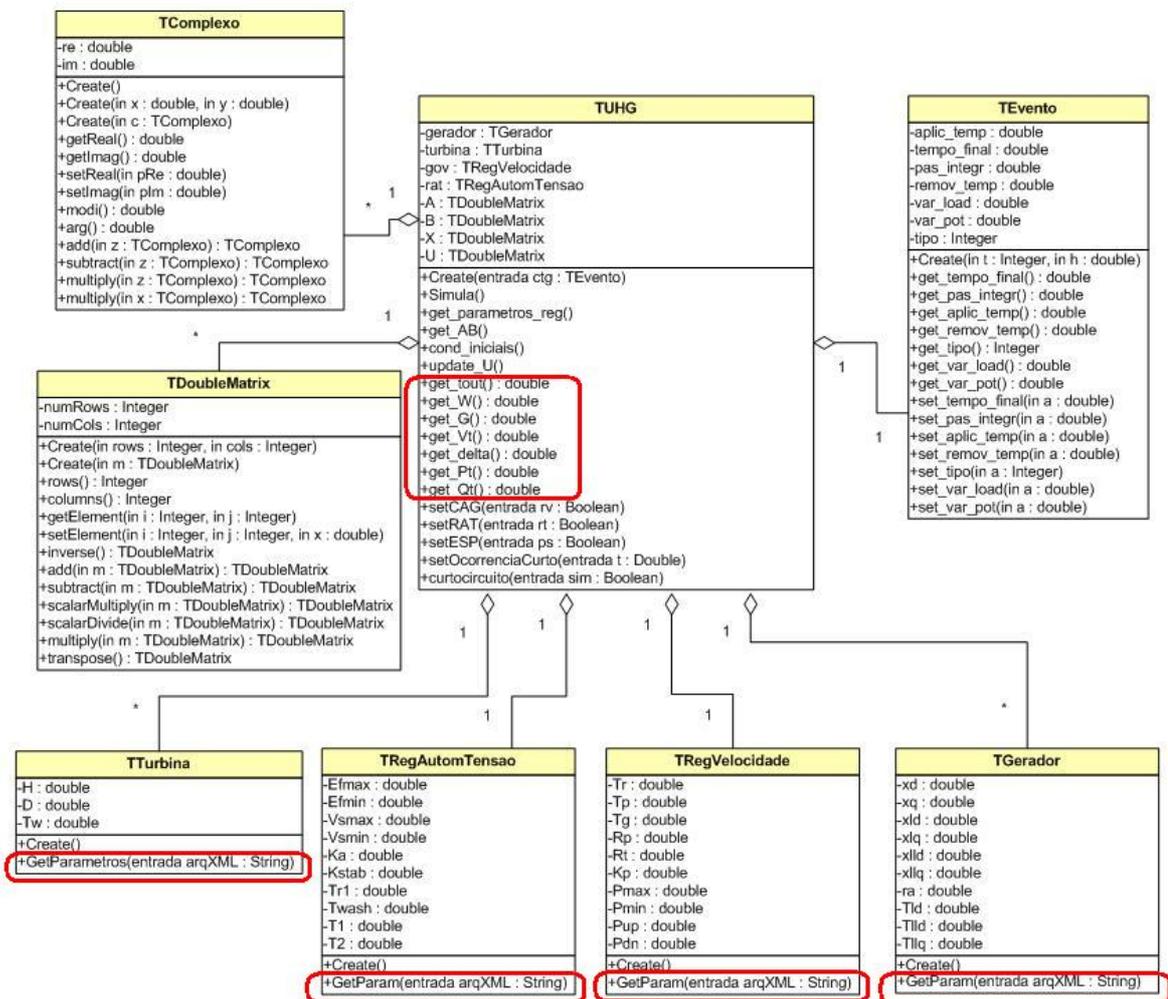


Figura 5.5 – Diagrama de classes para o simulador dinâmico da UHE, desenvolvido na presente dissertação de mestrado.

Observando a Figura 5.5, nota-se que existe um relacionamento de agregação entre a classe principal, chamada TUHG e o restante das classes, ou seja, abstraindo-se uma unidade hidrogeradora através da classe TUHG, pode-se pensar que esta possui sub-componentes tais como turbina, gerador e dispositivos de regulação. A abstração desses componentes é dada através das classes: **TTurbina**, **TRegAutomTensao**, **TRegVelocidade** e **TGerador**.

Pode-se observar também que a interface entre o ambiente virtual e as grandezas eletromecânicas do simulador é dada através dos seguintes métodos da classe **TUHG**:

- **get\_W** – retorna um valor da frequência do gerador em p.u, para cada iteração.
- **get\_G** – retorna um valor da abertura do distribuidor da turbina em porcentagem, para cada iteração.
- **get\_Vt** – retorna um valor da tensão terminal do gerador em p.u, para cada iteração.
- **get\_delta** – retorna um valor do ângulo de carga do gerador em radianos, para cada iteração.
- **get\_Qt** – retorna um valor da potência reativa do gerador em p.u, para cada iteração.
- **get\_Pt** – retorna um valor da potência ativa do gerador em p.u, para cada iteração.

## 5.6 Interface

O sistema de interface é flexível, modificando alguns de seus elementos de acordo com o que está sendo mostrado na tela. Esta flexibilidade é obtida pela manutenção de dados sobre elementos de interface e seqüência de treinamento de cada exercício dentro dos arquivos XML, relacionando uns aos outros. A interface possui menus, botões e informações que se alteram de acordo com o que está ocorrendo no mundo virtual. Isto é conseguido porque essas informações estão armazenadas nos documentos XML. A cada interação do usuário, o sistema carrega as informações dos documentos XML daquele ponto, assim, a mesma interface pode ser utilizada sem alterações para outros tipos de treinamento, sem necessidade de modificação no código do programa desenvolvido (PAMPLONA, 2006a; PAMPLONA, 2006b).

A interface é dividida em: informações sobre a hierarquia das partes e treinamento na parte superior, botões de ações sobre o lado esquerdo, mundo virtual na região central da tela e a exibição de informações textuais na parte inferior. A Figura 5.6 mostra os elementos da interface do sistema.

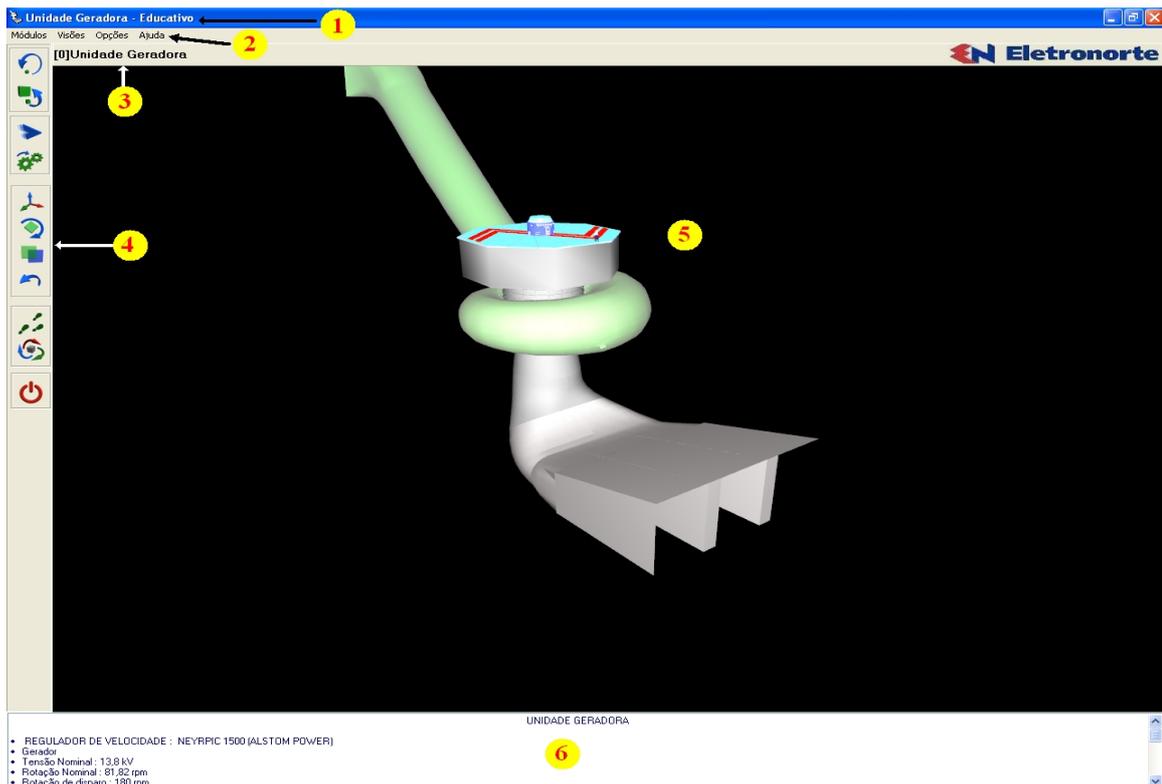


Figura 5.6 – Interface inicial do Sistema, destacando suas principais características.

A seguir é conceituada cada uma de suas partes:

1. **Barra de Títulos:** A parte superior da janela é usada para exibir o nome da aplicação, Unidade Geradora Virtual e o módulo selecionado. No início da execução, como o usuário ainda não selecionou nenhum módulo, esta parte ainda não aparece.
2. **Barra de Menus:** Nesta área são disponibilizados os menus que os usuários terão acesso. No início da aplicação, as opções disponíveis são: Módulos, Visões, Árvore de peças e Ajuda.
3. **Árvore de Peças:** Este painel, exibido sob o menu, mostra a hierarquia das peças que constituem a UGV. O nível mais alto, ou a raiz é numerado com 0 (zero) e corresponde a UGV como um todo. Os demais níveis da UGV são numerados crescentemente. Neste painel, o usuário visualiza o número correspondente e é possível visualizar o nome da peça ou agrupamento de peças, sendo exibido no mundo virtual e seu nível na hierarquia da UHE.
4. **Botões de Ação:** O lado esquerdo da interface contém os botões que são utilizados pelo usuário para interagir com o mundo virtual. Esses botões são

- agrupados por funcionalidades e permitem com que o usuário possa mover-se no ambiente e mover as peças, rotacioná-las, torná-las transparentes, etc.
5. **Mundo Virtual:** Esta é a área nas quais as renderizações tridimensionais ocorrem. O usuário interage diretamente com as peças exibidas através do picking, para obter informações, desmontá-las, descer níveis na hierarquia, etc.
  6. **Área Textual:** A parte inferior da tela exibe informações textuais sobre o que está acontecendo no mundo virtual. O conteúdo dessas informações é variável e dependente das ações que ocorrem no mundo virtual. Na parte educacional, cujo objetivo é demonstrar as características de cada componente da UHE, são exibidas informações como tamanho, peso, material, características de funcionamento, entre outras.

## 5.7 Comandos da Barra de Menus

Os comandos da Barra de Menus estão agrupados em 4 menus principais, conforme mostra a Figura 5.7, ferramenta pela qual o usuário tem acesso direto às configurações globais do sistema.



Figura 5.7 – Barra de menus da aplicação.

Os principais menus do sistema são: Módulos, Visões, Árvore de Peças.

- **Menu Módulos:** A opção módulos do menu, expandida na Figura 5.8, permite ao usuário escolher o tipo de operação que o programa executará. Neste trabalho será abordado sobre as funcionalidades do Módulo Operação. Os demais módulos utilizam os mesmos conceitos que serão vistos para o Módulo Operação, distinguindo apenas em suas funcionalidades.



Figura 5.8 – Menu Módulos.

- **Menu Visões:** As visões são posições de observador predefinidas que permitem visualizar a UGV de pontos estratégicos, seja para a compreensão de seu funcionamento, seja por serem locais importantes do ponto de vista de aprendizado. A figura 5.9 mostra o menu visões.

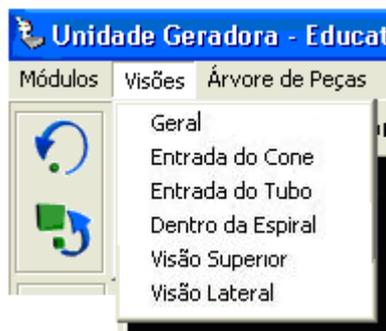


Figura 5.9 – Menu Visões.

- **Menu Árvore de Peças:** Além da exibição do nível atual na hierarquia da UGV, que aparece no painel da árvore de peças, como foi visto anteriormente, também é possível através do menu na opção Árvore de Peças, exibir uma janela pop-up com a árvore de peças da parte da UGV que está sendo exibida no momento no mundo virtual, conforme apresentado na Figura 5.10 a seguir.

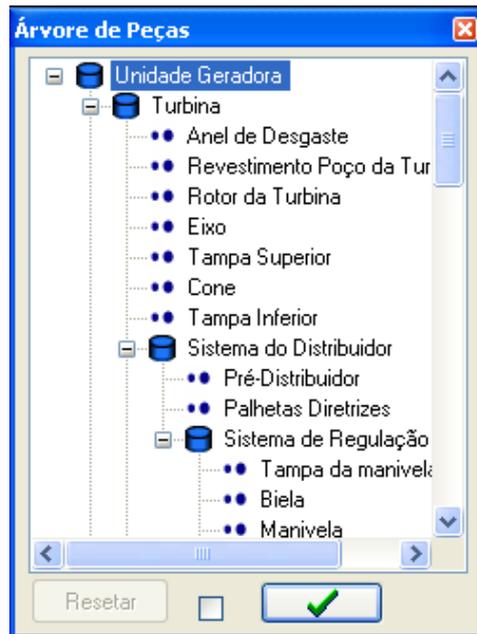


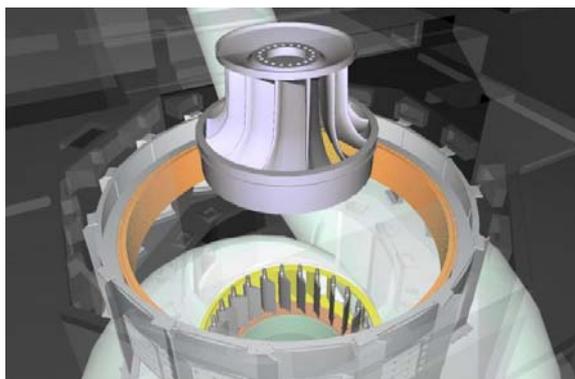
Figura 5.10 – Janela da Árvore de Peças, mostrando agrupamentos e peças.

## 5.8 Módulos

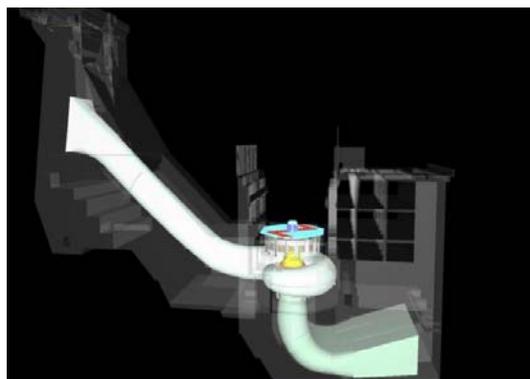
Conforme foi abordado em tópicos anteriores, a opção Módulos define a modalidade de treinamento executado pelo usuário, a qual divide-se em três Educativo, Manutenção e Operação.

No Módulo Educativo o usuário pode escolher uma seção, desmontá-la e remontá-la novamente. A cada passo, além de visualizar a peça mecânica em questão (podendo interagir à vontade), recebe informações textuais sobre a mesma. Pode tornar transparentes partes da UHE para visualizar peças interiores, navegar por todo o mundo virtual e escolher entre cinco ângulos de visão pré-definidos para um melhor entendimento do funcionamento do sistema. Para promover uma percepção mais dinâmica do treinamento quanto às inter-relações das peças, o treinando pode executar dois tipos de animação. Uma da montagem das peças da UHE na seqüência em que ocorrem na prática. Outra do funcionamento da UHE, observando o movimento de todas as peças envolvidas, como o sistema rotor da turbina/eixo/rotor do gerador.

Nas Figuras 5.11 e 5.12 tem-se um esquema de animação da montagem das peças para o Módulo Educativo.

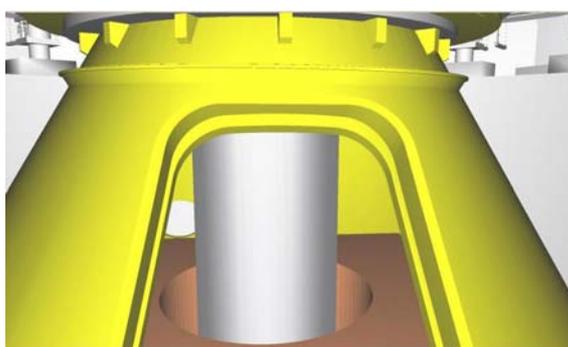


**Figura 5.11 – Vista superior enquanto a animação da montagem das peças ocorre.**

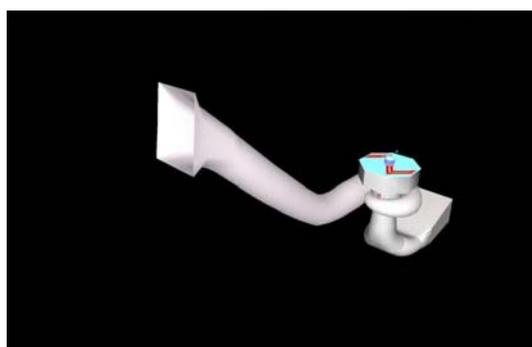


**Figura 5.12 – Vista lateral do final do processo de montagem.**

Conforme foi abordado em tópicos anteriores, através do Menu Visões é possível visualizar posições estratégicas da UHV. Nas Figuras 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16 tem-se os possíveis ângulos de vista da UHV, para o Módulo Educativo.



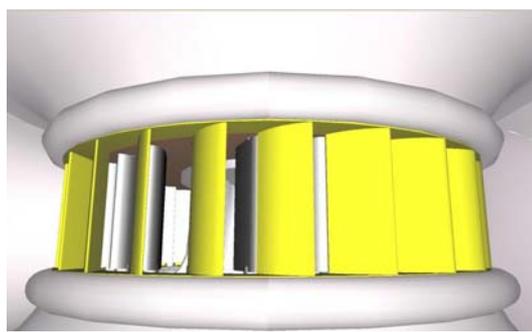
**Figura 5.13 – Entrada do cone local onde se pode visualizar o funcionamento interno da máquina.**



**Figura 5.14 – Entrada do tubo de onde se tem a altura da UGV e se vê a tomada de água.**



**Figura 5.15 – Porta eclusa da caixa espiral, passagem por onde se entra para realizar diversas manutenções.**

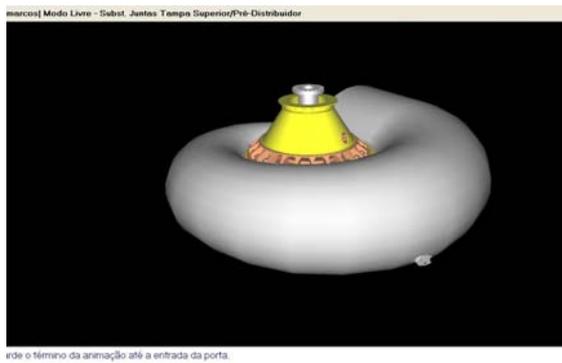


**Figura 5.16 – Interior da caixa espiral de onde se tem uma visão do funcionamento do rotor e do sistema distribuidor.**

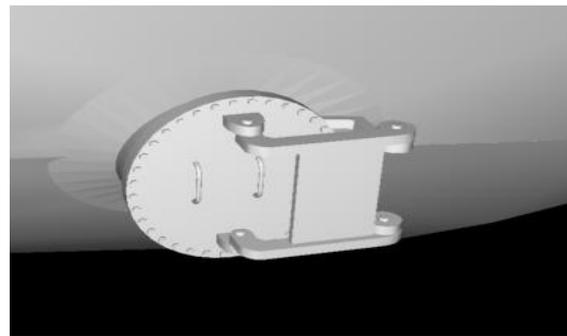
No Módulo de Manutenção, o objetivo é permitir que o usuário possa executar virtualmente os procedimentos de manutenção que são efetuados na UHE. O

módulo possui três modos de treinamento com graus de dificuldades crescentes que dependem do nível de conhecimento do treinando sobre o procedimento de manutenção. O usuário entra com login e senha, permitindo que o sistema registre sua evolução em cada treinamento e permitindo que ao retornar ao treinamento, inicie do ponto em que parou. O usuário só pode passar ao próximo modo, se finalizar as tarefas do modo em que se encontra. Os modos de treinamento são: automático, auxiliado e exploratório.

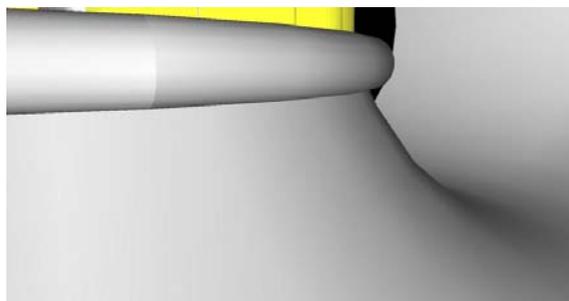
As Figuras 5.17 a 5.20 mostram a animação do procedimento de manutenção da troca da junta entre o pré-distribuidor e a tampa superior do distribuidor. A visão que o usuário tem é a mesma que terá ao efetuar a manutenção na prática, ou seja, no sistema hidráulico. Nesta figura é visualizada a fase de desmontagem, em que foram retirados os parafusos da prensa-junta (em branco), a prensa-junta (em verde) e finalmente a junta (em azul). A montagem é realizada na ordem inversa.



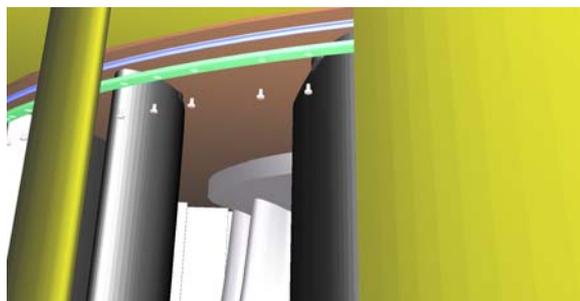
**Figura 5.17 – Visão do observador no início da manutenção.**



**Figura 5.18 – Visão da porta da caixa espiral por onde será realizado o procedimento de manutenção.**



**Figura 5.19 – Visão do interior da caixa espiral direcionando-se para o ponto de manutenção.**



**Figura 5.20 – Animação da manutenção da junta entre o pré-distribuidor e a tampa superior.**

## 5.9 Módulo de Operação

O Módulo de operação foi projetado para familiarizar o operador quanto ao funcionamento dinâmico da UHE integrada a um Sistema Elétrico de Potência (SEP), explorando os recursos de RV na visualização da UHE em operação dinâmica, mostrando os detalhes dos movimentos das peças articuladas da Turbina, tais como o Sistema do Distribuidor e o conjunto formado pelo Eixo, Rotor do Gerador e Rotor da Turbina.

Considerando-se a UHE operando em regime, tem-se apenas o rotor da turbina girando a uma velocidade constante, portanto para observar os distúrbios transitórios eletromecânicos da UHE, foi implementado um sub-módulo chamado Contingências, conforme mostra a Figura 5.21.



Figura 5.21 – Módulo Operação: Contingências.

Na Figura 5.22 tem-se a interface inicial do Módulo Operação, com a enumeração de seus elementos de interface.



Figura 5.22 – Interface inicial para o módulo “Operação”.

Abaixo são conceituadas cada uma de suas partes:

1. **Mundo Virtual:** Esta é a área na qual tem-se uma representação visual da UHE em operação, onde ocorrem as animações. O usuário interage com o mundo virtual através dos botões de ação descritos a seguir.
2. **Botão Redesenho:** Este botão permite que a qualquer momento o usuário possa retornar a situação inicial da UGV
3. **Botão Girar:** Este botão coloca a UHE em operação, fazendo com que a turbina e as partes girantes da UHE entrem em movimento rotacional nas condições de regime.
4. **Botão Aplicar:** Simula uma contingência na UHE. Neste caso, um curto circuito na saída da subestação da usina, provocando a animação das peças do distribuidor, decorrente da atuação do regulador de velocidade, considerando assim aspectos relacionados com a variação na velocidade do eixo do rotor do conjunto turbina-gerador.
5. **Botão Navegar:** Navega pelo ambiente virtual utilizando o mouse ou teclado (teclas direcionais).
6. **Botão Rotacionar Todas:** Com este botão é possível rotacionar todo o conjunto de peças de forma a ter um melhor perfil de visualização.
7. **Botão Sair do Programa:** Este botão fecha todas as aplicações e sai do programa.
8. **Botão Oscilografias:** Este botão abre a janela de interface Gráficos, descrita a seguir.

De forma a ter uma visualização gráfica das principais grandezas eletromecânicas da UHE, durante a operação, foi desenvolvida a interface Gráficos. Esta interface é habilitada ao clicar no botão Oscilografias, mostrado na interface anterior da Figura 5.19. Na Figura 5.23 tem-se a interface Gráficos, com a enumeração de seus elementos de interface.

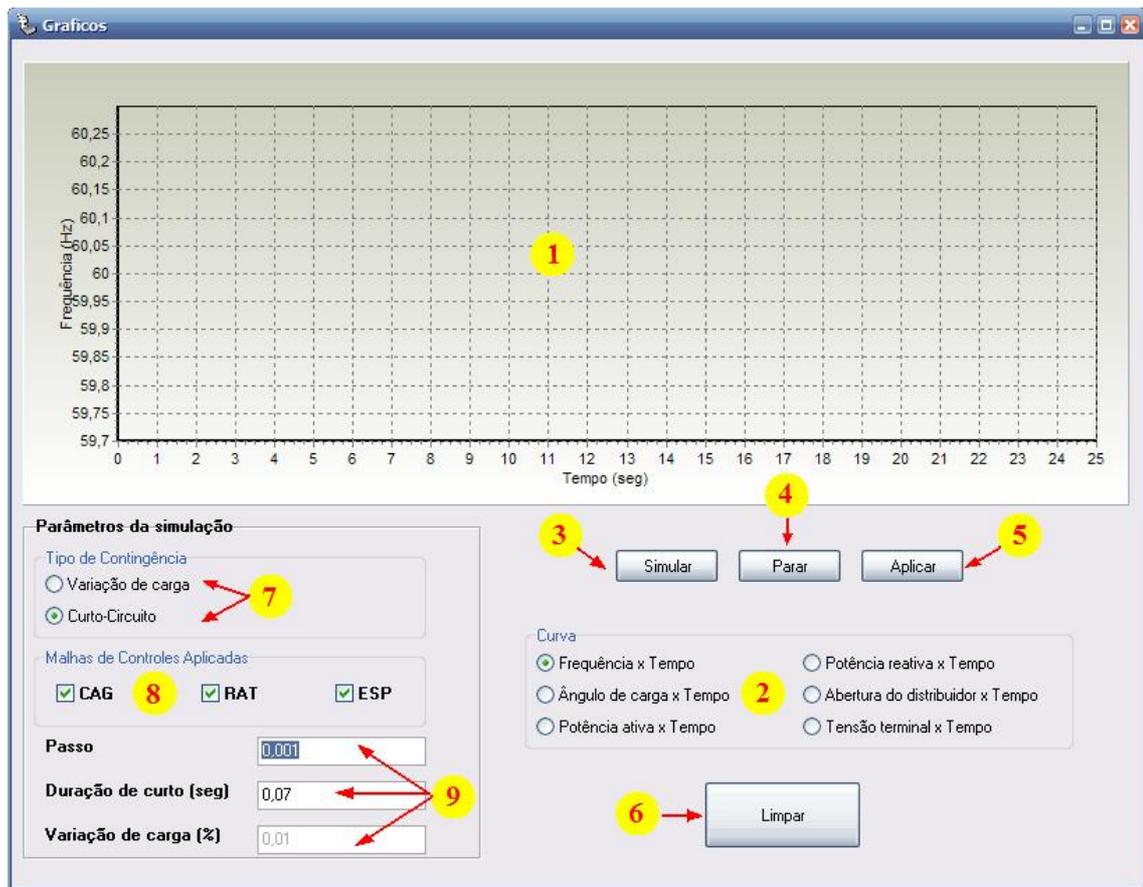


Figura 5.23 – Interface “Gráficos”.

Abaixo são conceituadas cada uma de suas partes:

1. **Área de Gráficos:** Região onde serão traçados os gráficos das principais grandezas eletromecânicas da UHG.
2. **Curva:** Nesta região tem-se o grupo de rádio Curva, onde o usuário escolhe qual tipo de grandeza ele deseja visualizar graficamente.
3. **Botão Simular:** Através deste botão o usuário inicia a simulação da dinâmica da UHE.
4. **Botão Parar:** Ao clicar neste botão, o usuário pode parar a simulação.
5. **Botão Aplicar:** Ao clicar neste botão, o usuário inicia a aplicação da contingência escolhida antes da simulação.
6. **Botão Limpar:** Este botão é responsável por limpar a Área de Gráficos, para uma nova simulação.
7. **Tipos de Contingência:** Através do grupo de botões de rádio Tipos de Contingência, o usuário escolhe qual tipo de contingência deseja aplicar antes da simulação.

8. **Malhas de Controle Aplicadas:** Nesta caixa de grupo, o usuário escolhe qual malha de controle deseja agregar a UHE.
9. **Parâmetros da Simulação:** Esta região possui três caixas de texto, onde o usuário entra com o valor do passo de integração da simulação, duração do curto, caso a opção curto-circuito do item 7 seja habilitada e variação de carga, quando habilitada a opção variação de carga do item 7.

Além do sub-módulo Contingências, existe também o sub-módulo Ensaio do Distribuidor, o qual o usuário pode efetuar a verificação das constantes de tempo da válvula distribuidora, verificação da velocidade de fechamento e abertura do distribuidor e os ganhos associados.



Figura 5.24 – Módulo “Operação”: “Ensaio do Distribuidor”.

Este sub-módulo reproduz os testes realizados por OLIVEIRA, *et al.*, (2005), objetivando o desenvolvimento de um novo modelo para o regulador de velocidade da UHE de Tucuruí, através de um novo conjunto de ajustes do estatismo transitório.

Com a unidade geradora parada e sem passagem de água pela turbina, pode-se aplicar degraus na entrada do regulador de velocidade, isto é, no somador da malha, sem a realimentação do erro da frequência, com ou sem a malha de atuação do estatismo transitório.

A Figura 5.25 mostra a interface Ensaio do Distribuidor, cujas funcionalidades se assemelham às da interface Gráficos do sub-módulo Contingência. A única diferença é que o usuário aplica degraus na entrada do regulador de velocidade, controlando manualmente a abertura e fechamento do distribuidor da turbina.

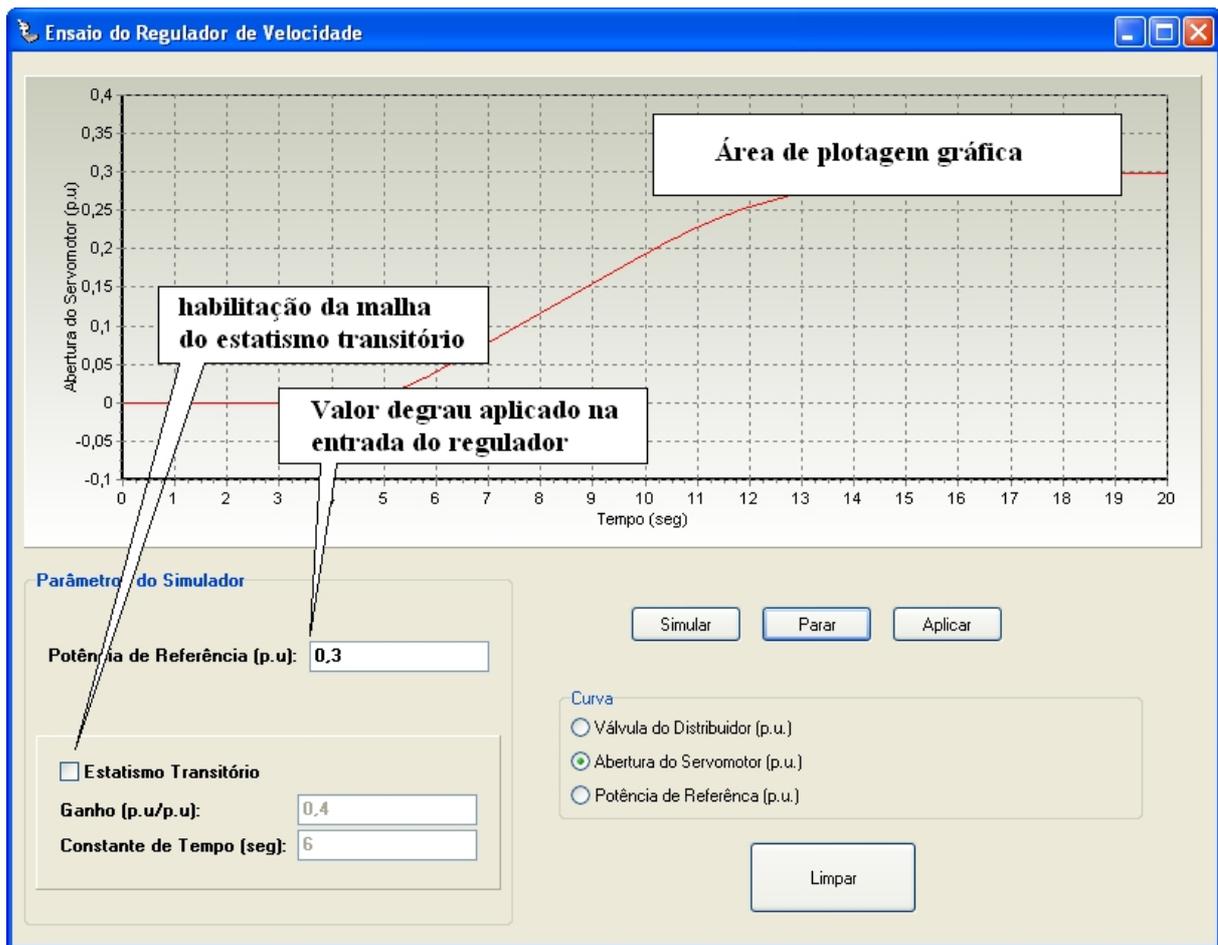


Figura 5.25 – Interface “Ensaio do Distribuidor”.

### 5.9.1 Funcionalidades do Módulo de Operação

Ao entrar no sub-módulo Contingências do módulo de operação, através da barra de menu, tem-se a tela inicial, dada pela Figura 5.26. Para se ter uma visão da UHE operando em regime permanente, o usuário clica no botão Girar. Realizado este procedimento, observa-se que a estrutura formada pela caixa espiral, se torna transparente, para que o usuário tenha uma visão interna do distribuidor da turbina, conforme mostra a Figura 5.27.

De forma a ter um melhor ângulo de visão do Distribuidor da turbina, é possível aproximar-se deste com a ajuda do botão navegar, utilizando-se as teclas de navegação ou o mouse.

Feito isto, tem-se a imagem da Figura 5.28, onde são visualizados os servomecanismos do distribuidor interligados à tampa superior da turbina. Estes,

junto com as palhetas diretrizes, eixo e rotor do gerador, estarão em movimento durante a animação da UHE em operação.

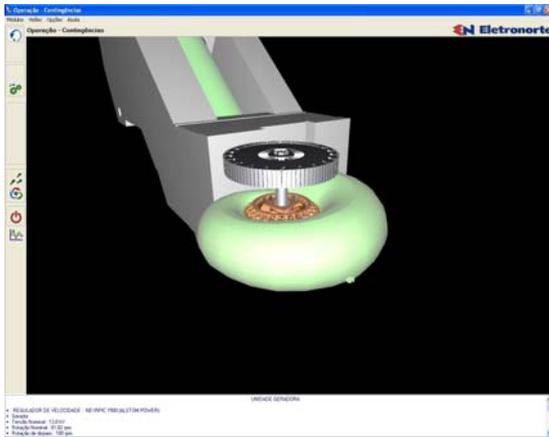


Figura 5.26 – Tela inicial do sub-módulo “Contingências”.

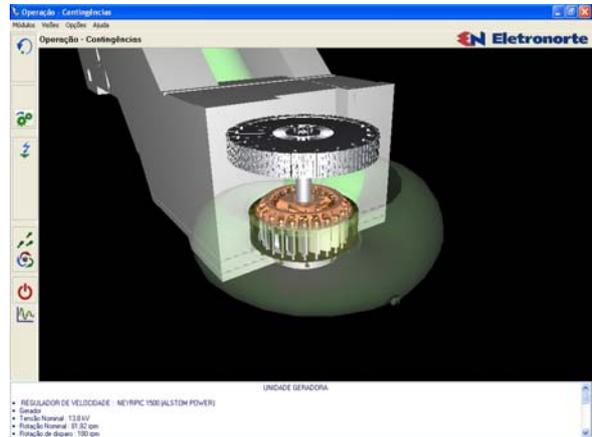


Figura 5.27 – Sub-módulo “contingência” após pressionar o botão Girar.

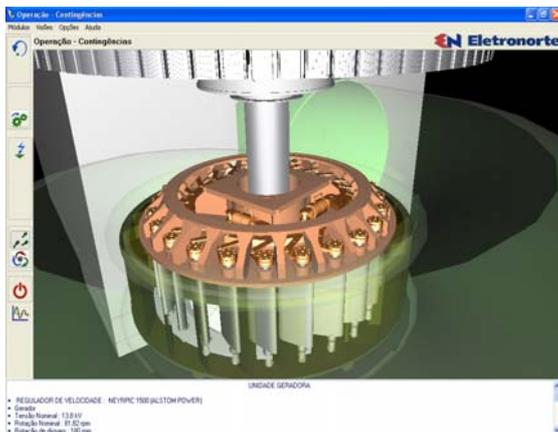


Figura 5.28 – Visão do distribuidor ao se aproximar com as teclas direcionais.

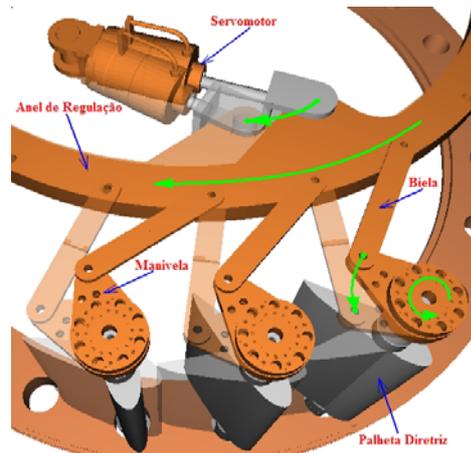


Figura 5.29 – Peças móveis animadas durante a simulação.

A animação das partes móveis da UHE é regida pela dinâmica eletromecânica do conjunto Turbina/Gerador, modelada nesta dissertação, sendo que conforme o evento a simular, uma determinada contingência pode alterar dinamicamente os valores da velocidade do rotor, torque mecânico, abertura do distribuidor e tensão terminal.

Na mesma seqüência, ao pressionar no botão Aplicar Contingência, tem-se a aplicação de um curto-circuito no terminal da Subestação da UHE. Neste ponto, entra em operação a atuação do regulador de velocidade através da animação do sistema Distribuidor da Turbina. Durante a operação da usina, o controle primário

de velocidade da turbina, basicamente monitora a velocidade do eixo do conjunto Turbina-Gerador.

Para uma turbina tipo Francis, o controle é exercido por um conjunto formado por palhetas móveis, servomotores e anel de regulação, chamados coletivamente de distribuidor. Tal controle é realizado mediante a alteração da posição do distribuidor. As palhetas diretrizes do distribuidor são defletidas simultaneamente através da rotação de um anel de comando no qual cada palheta está articulada. Na Figura 5.29 tem-se um esquema do movimento das peças do Distribuidor.

Outra funcionalidade observada para este módulo seria a visualização das grandezas físicas simuladas durante a operação da UHE, por meio de oscilografias.

Esta interface seria habilitada através do botão oscilografias, abrindo a janela Gráficos, conforme mostra a Figura 5.30.

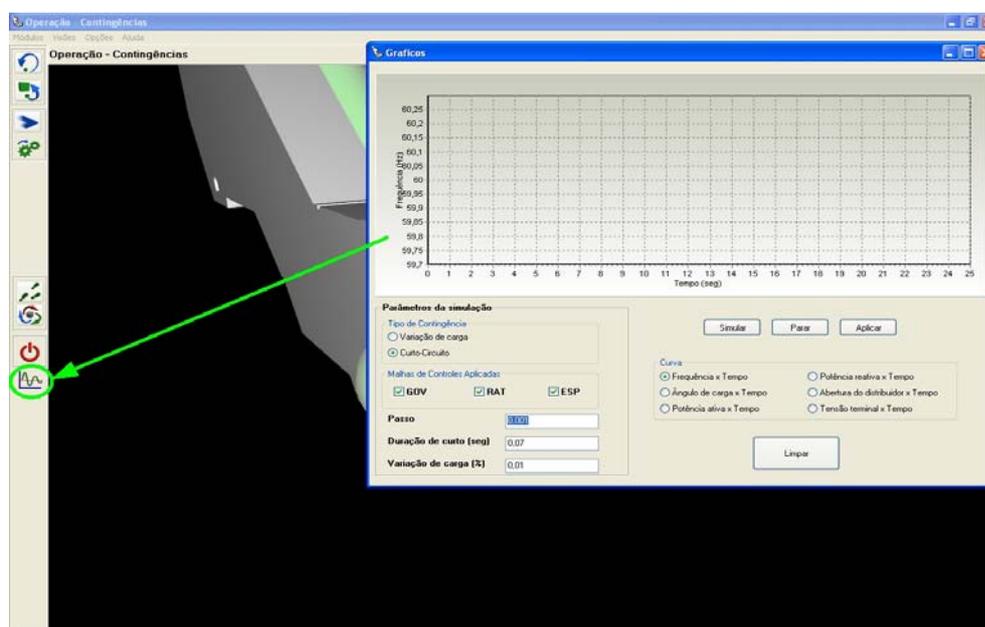


Figura 5.30 – Tela inicial da interface “Gráficos”.

Através da interface Gráficos do Módulo Operação, efetuou-se as seguintes simulações de contingências: um curto-circuito no terminal de alta tensão, próximo ao transformador da rede, cuja topologia foi definida na Figura 4.1, com duração de 0,07 segundos, em seguida a uma variação de carga de 50%.

Os resultados da dinâmica da UHE são apresentados através dos gráficos das Figuras 5.31 a 5.37.

O gráfico da Figura 5.31 mostra um rápido afundamento de tensão decorrente da falta na rede, com uma rápida oscilação na frequência do gerador, Figura 5.32, alcançando seu valor de regime nominal em 4 segundos. Tais valores podem ser visualmente observados no mundo virtual, minimizando-se a janela Gráficos, de acordo com a Figura 5.34, através da variação da velocidade do eixo do rotor da turbina.

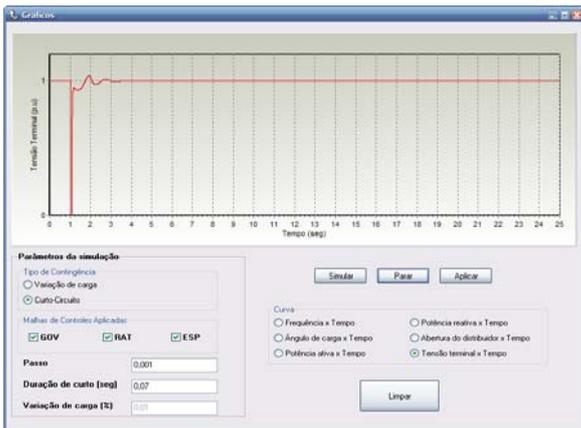


Figura 5.31 – Tensão terminal, para um curto-circuito.

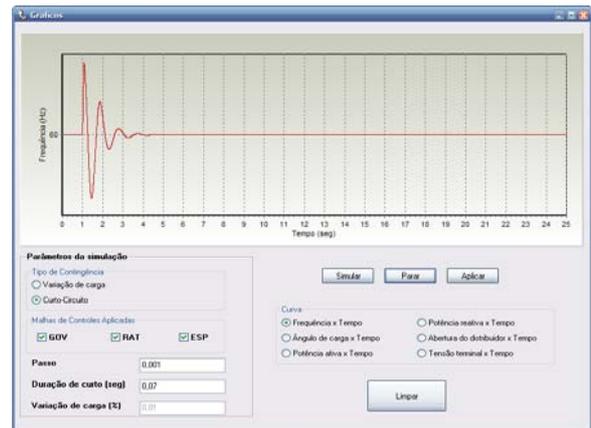


Figura 5.32 – Frequência do gerador, para um curto-circuito.

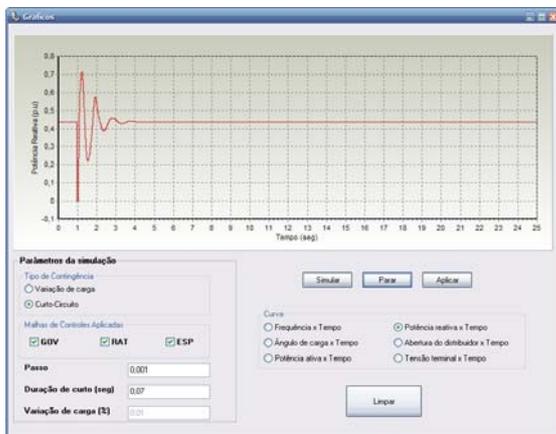


Figura 5.33 – Potência Reativa do gerador, para um curto-circuito

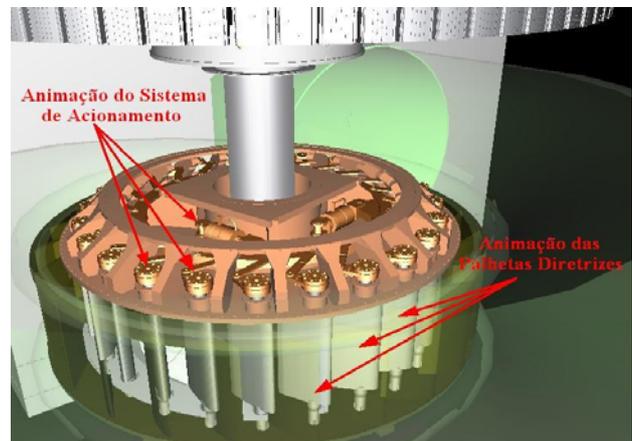


Figura 5.34 – Ambiente virtual da contingência.

Outro tipo de contingência a ser analisado representa uma variação de carga, onde os parâmetros são ajustados na interface Gráficos, conforme a Figura 5.35. Os gráficos das Figuras 5.37 e 5.38 mostram uma queda inicial da frequência do gerador, com um rápido aumento na abertura do distribuidor, de forma a contrabalancear a perturbação inicial, para uma variação de carga. Essas grandezas podem ser visualmente observadas no mundo virtual, onde também se verifica o

movimento das palhetas diretrizes durante o transitório, até alcançarem uma nova posição de regime com um novo ângulo de ataque, de acordo com a Figura 5.34.

Os gráficos das Figuras 5.36 e 5.39 mostram, após o transitório, o ângulo de carga e potência reativa alcançando um novo valor de regime, decorrente do novo carregamento.

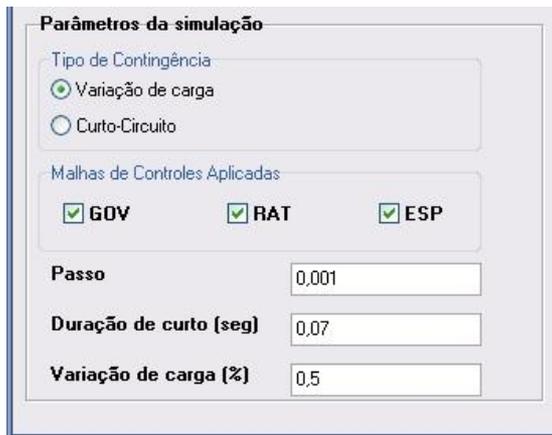


Figura 5.35 – Ajuste dos parâmetros para simulação de variação de carga.

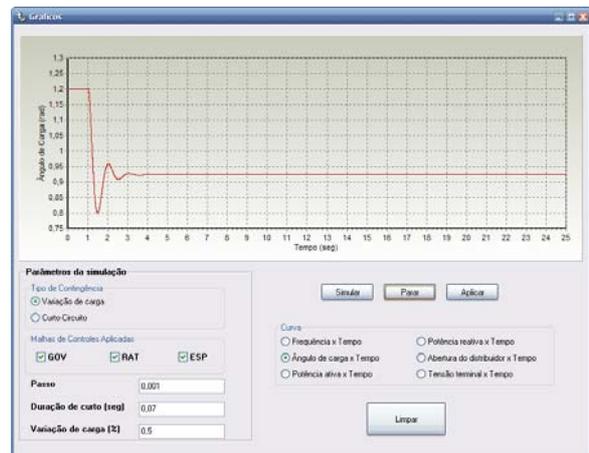


Figura 5.36 – Ângulo de carga, para variação de carga.

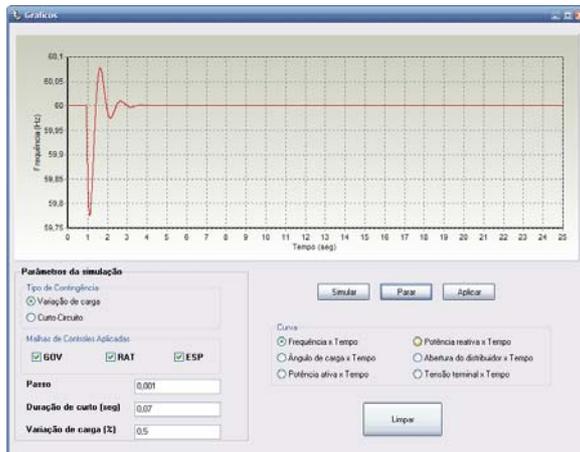


Figura 5.37 – Frequência do gerador, para uma variação de carga.

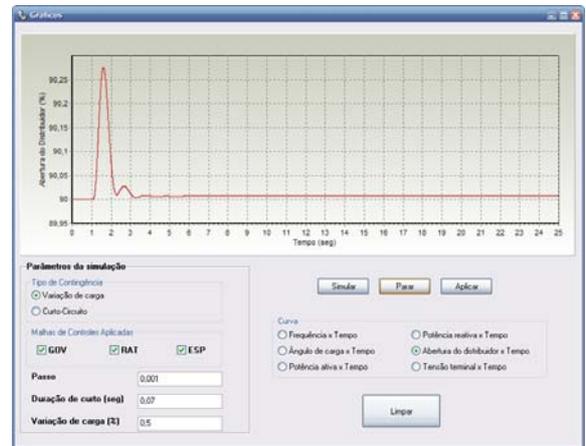


Figura 5.38 – Abertura do distribuidor, para uma variação de carga.

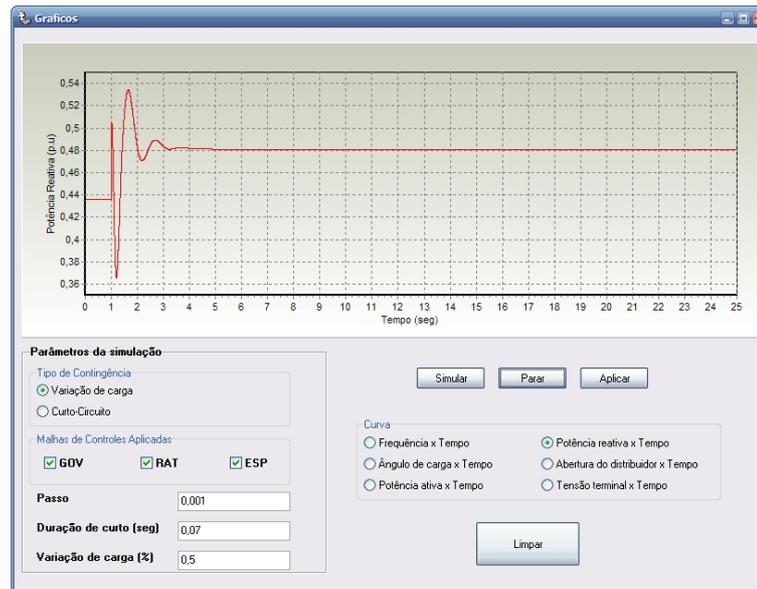


Figura 5.39 – Potência reativa do gerador para uma variação de carga.

Ao entrar no sub-módulo Ensaio do Distribuidor do módulo de operação, através da barra de menu, tem-se a tela inicial, apresentada na Figura 5.34.

A funcionalidade observada para este módulo seria a visualização das grandezas físicas simuladas durante o comando manual do distribuidor, por meio de oscilografias.

O teste proposto apresenta o ensaio com a simulação para um degrau de 30% no regulador de velocidade sem estatismo transitório, sendo mostrada a válvula do distribuidor, Figura 5.41 e abertura do servomotor, Figura 5.42.

É importante ressaltar que essas grandezas podem ser visualizadas dinamicamente no ambiente virtual, similar ao sub-módulo Contingências, descritos pelas Figuras 5.43 e 5.44.

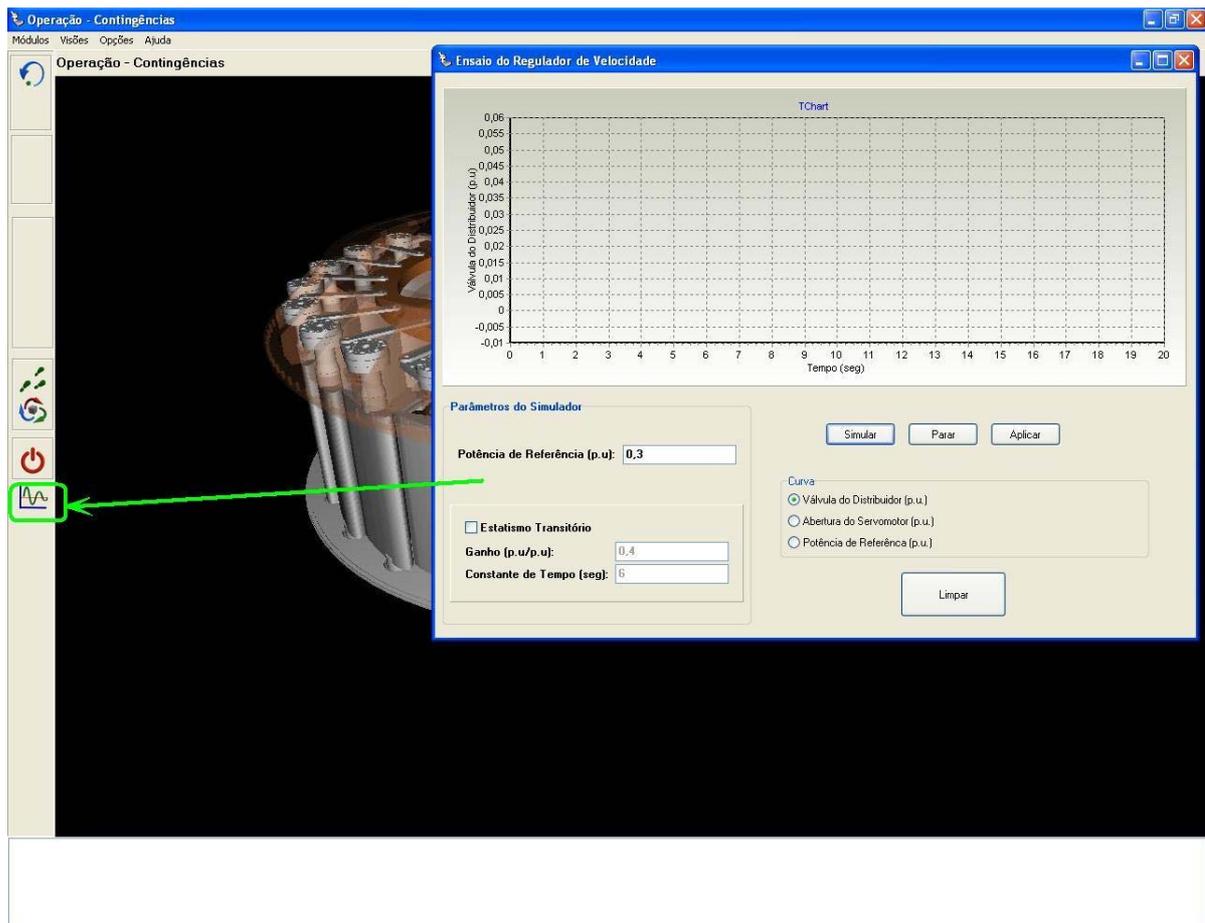


Figura 5.40 – Tela inicial da interface “Ensaio do distribuidor”.

Observando-se a Figura 5.41, nota-se o distribuidor alcança o regime em 30% de abertura, com um tempo de aproximadamente 10 segundos. Este valor considerável de tempo de acomodação deve-se às elevadas constantes de tempo das partes mecânicas e hidráulicas do distribuidor, como por exemplo, a constante de tempo do servomotor.

Outra grandeza observada é a variação da válvula distribuidora, visualizada na Figura 5.42. Nota-se pelo gráfico uma resposta rápida ao degrau de entrada, alcançando a saturação em 0,0515 pu/pu, valor máximo definido pelo limitador do diagrama de bloco do regulador de velocidade. É importante ressaltar que esta grandeza representa a velocidade de abertura do distribuidor, portando, após alcançar o regime estacionário em 10 segundos, observa-se que o sinal se estabiliza em zero.

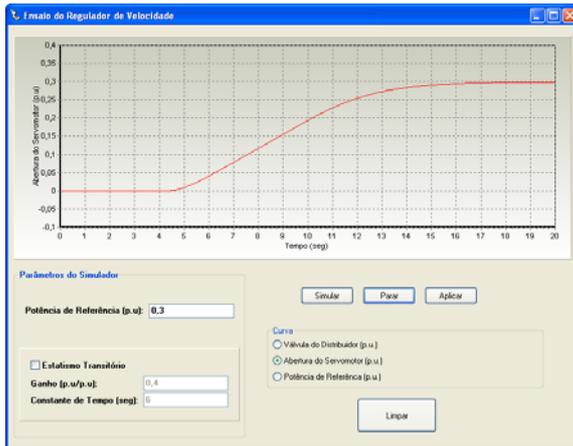


Figura 5.41 – Abertura do distribuidor

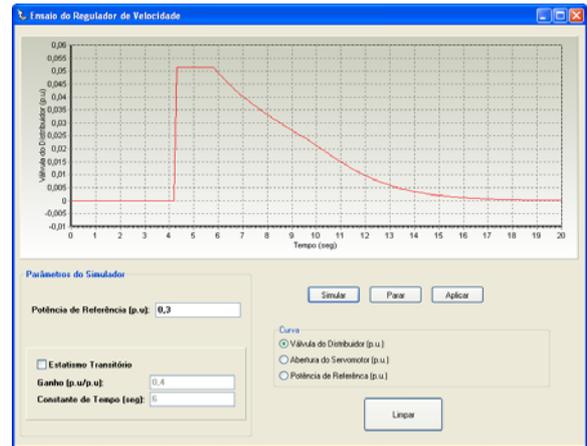


Figura 5.42 – Válvula distribuidora.

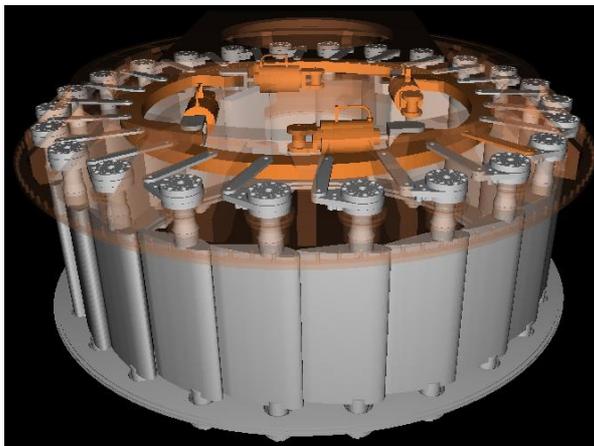


Figura 5.43 – Distribuidor totalmente fechado.

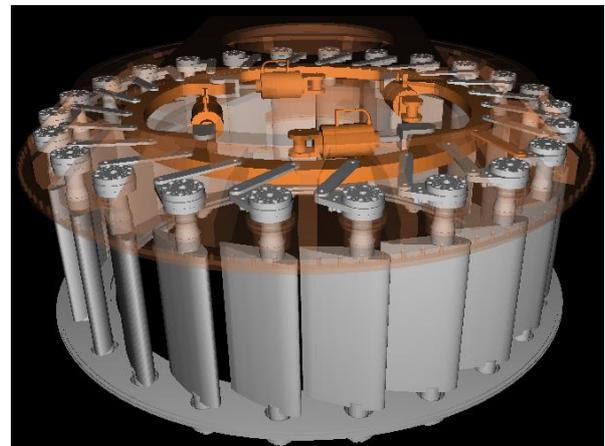


Figura 5.44 – Distribuidor com 30% de abertura.

## 5.10 Considerações Finais

Este capítulo descreveu a estrutura computacional da UHE virtual desenvolvida, abordando as principais ferramentas utilizadas, a modelagem do ambiente virtual, a arquitetura do sistema, assim como, a interface deste.

Com relação à metodologia adotada, utilizou-se a modelagem orientada a objetos, aplicando-se como técnica de engenharia de software o processo unificado, em conjunto com o uso de diagramas UML.

Além dos aspectos construtivos do sistema, foi mostrado também os resultados visuais do programa, destacando a UHE em operação, interagindo com o ambiente virtual, sob certas contingências.

Por meio da interface visual o usuário pode se familiarizar com o mecanismo de funcionamento da UHE, principalmente com relação ao sistema de regulação do distribuidor da turbina.

## **CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**

### **6.1 Conclusões**

Nesta dissertação foi apresentada a arquitetura e implementação de um sistema de realidade virtual desktop para treinamento e estudo de uma UHE. Por ser baseada em documentos XML, criados para suportar a arquitetura e a forma como os modelos CAD são utilizados no sistema, o mesmo é flexível, permitindo que possa ser adaptado, reutilizado e ainda acrescido de novas funcionalidades, de acordo com as necessidades de cada caso, bastando para isto alterar os documentos XML e os modelos a serem carregados.

Uma das principais conclusões obtidas com o que é proposto foi a demonstração da possibilidade do desenvolvimento de um ambiente de treinamento de RV, para os operadores de uma UHE, com baixo custo, utilizando uma arquitetura baseada em computador pessoal.

O sistema foi desenvolvido com base na metodologia orientada a objetos, sendo que este pode ser facilmente depurado, de fácil manutenção e entendimento. Novas classes podem ser integradas dentro do mesmo para suportar novas funcionalidades.

De forma a dar maior realismo quanto à parte operativa da usina, foi desenvolvido o módulo de operação com modelos dinâmicos eletromecânicos integrados às UHEs, incorporados ao ambiente virtual, permitindo ao usuário visualizar a animação de uma unidade geradora operando tanto em regime permanente, quanto sob alguma perturbação sofrida, proveniente de determinada contingência. Ressalta-se a inovação da modelagem no ambiente de RV das usinas hidráulicas.

Portanto, este trabalho tem uma contribuição importante, no sentido de tornar o entendimento do processo de geração, operação e controle da UHE o mais simples possível e de uma forma cognitiva, através dos recursos de RV para visualização e animação dos componentes da usina, responsáveis pela transformação da energia mecânica em elétrica, além do entendimento da forma de controle desta, através da visualização do processo mecânico do distribuidor da mesma.

Quando comparado a outros trabalhos na área, como o de JIANG GUO *et al.*, (2003), que apresenta um sistema de visualização de uma UHE, e uma proposta de arquitetura de hardware e software para RV desktop, nota-se que esta dissertação oferece uma série de vantagens, principalmente no que tange à implementação de rotinas que simulam a dinâmica de operação da UHE, interagindo com o ambiente virtual através da animação dos dispositivos mecânicos do distribuidor e das partes girantes formadas pelo conjunto turbina-gerador.

A primeira versão deste sistema foi implantada na Usina Hidrelétrica de Tucuruí e o retorno fornecido por seu corpo técnico foi positivo e resultou e continua resultando em diversas das funções apresentadas.

## **6.2 Trabalhos Futuros**

Como sugestões de trabalhos futuros poderiam ser desenvolvidos os seguintes estudos:

1. Modelagem de procedimentos de partida e parada de unidades hidrogeradoras, como um subconjunto do “Módulo Operação”, expandindo ainda mais as funcionalidades do sistema;
2. Expandir o módulo para outros tipos de turbinas hidráulicas, diversificando o estudo sobre geração hidráulica;
3. Estudar o comportamento dinâmico de usinas termelétricas (UTE), com relação às oscilações torcionais do conjunto turbina-gerador, utilizando os recursos de RV para melhor visualização de tais fenômenos atuando fisicamente nos vários eixos de acoplamento entre as várias seções dos rotores do conjunto turbina-gerador.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, L. (1994). **Visualização e realidade virtual**, Ed. Makron Books, São Paulo, 1994.
- AGOSTINI, M. N. (2002). **Nova Filosofia para o Projeto de Softwares para Sistemas de Energia Elétrica Usando Modelagem Orientada a Objetos**. Florianópolis. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- ARRILAGA, J. & WATSON, N. R. (2001). **Computer Modelling of Electrical Power Systems**. 2nd edition. John Wiley & Sons, West Sussex, England.
- ARROYO, E. & ARCOS, J. L. L. (1999). **SRV: A virtual reality application to electrical substations operation training**. In: IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems, vol. 01, pp. 835-839, 7-11 June, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Recepção em Modelos de Turbinas Hidráulicas** – NB 580. Rio de Janeiro, 1978.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Turbinas Hidráulicas, Turbinas-bombas e bombas acumulação** – NBR 6445. Rio de Janeiro, 1987.
- AUKSTAKALNIS, S. & BLATNER, D. (1992). **Silicon Mirage: The Art and Science of Virtual Reality**, Peatchpit Press, Berkeley, CA, 1992.
- BLUEMEL, E.; HINTZE, A.; SCHULZ, T.; SCHUMANN, M.; STUERING, S. (2003). **Virtual Environments for the Training of Maintenance and Service Tasks**. In: Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, vol.2. The Fairmont New Orleans, New Orleans, LA. 7-10 Dec. 2003. p.p. 2001-2007. Digital Object Identifier 10.1109/WSC.2003.1261664

- BYRNE, C. M. (1995) **The Use of Virtual Reality as Educational Tool**, Washington University, 1995.
- BURDEA, G. & COIFFET, P. (1994). **Virtual Reality Technology**, John Wiley & Sons, New York, NY, 1994.
- BURDEA, G.; PATOUNAKIS, G.; POPESCU, V.; WEISS, R. (1998). **Virtual Reality Training for the Diagnosis of Prostate Cancer**. Virtual Reality Annual International Symposium Proceedings, p. 190-197. IEEE, 1999.
- BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I. (1999) **The Unified Modeling Language: User Guide**. Addison Wesley, 1999.
- BOUD, A. C., HANIFF, D. J., BABER, C., STEINER, S. J. (1999). **Virtual Reality and Augmented Reality as a Training Tool for Assembly Tasks**. In: International Conference on Information and Visualization, 1999. vol. 4, pp.32-36.
- BROCKHINK, S. R.; GURNEY, J. H; SEELY, D. B.; *et al.* (2001). **Electric Power Generation: Conventional Methods**. In: \_\_\_\_\_The Electric Power Engineering Handbook. 9. Ed. CRC Press. Boca Raton, Florida, USA, 2001, p. 43-107.
- CRUZ-NEIRA, C. *et al.* (1992). **The CAVE Audio Visual Experience Automatic Virtual Environment**, Communication of the ACM, 35(6):64-72, June 1992.
- DINSMORE, M.; LANGRANA, N.; BURDEA, G.; LADEJI, J. (1997). **Virtual Reality Training Simulator for Palpation of Subsurface Tumors**. Virtual Reality Annual International Symposium Proceedings, p. 54-60. IEEE, 1997.
- DOS REIS, F. V. (2006). **Um Sistema de Realidade Virtual Desktop para Procedimentos de Montagem de uma Unidade Hidroelétrica de Energia e a Construção de uma Maquete Virtual de Uma Usina Hidrelétrica** - Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia da Computação - Universidade Federal do Pará - Belém - Pará.

- ELETRONORTE, Diretoria técnica. (1983). **Usina Hidrelétrica de Tucuruí – Memória Técnica**. Centrais Elétricas do Norte do Brasil – ELETRONORTE, Brasília – DF.
- GARAGA, A. K.; MCCLINTIC, K. T.; CAMPBELL, R. L. *et al.* (2001). **Hybrid Reasoning for prognostic learning in CBM systems**. In: Proc. 2001 IEEE Aerospace Conference. p. 2957-2969.
- GRIMSON, W.; KIKINIS, R.; JOLESZ, F.; BLACK, P. (1999). **Image-Guided Surgery**. Scientific American, v.280, n.6., p. 54-61, 1999.
- GUAN, C.G.; SERRA, L.; KOCKRO, R.A.; HERN, N.; NOWINSKI, W.L.; CHAN, C. (1998). **Volume-based Neurosurgery Planning in the Virtual Workbench**. Virtual Reality Annual International Symposium Proceedings, p. 167-173. IEEE, 1998.
- HAASE, H.; STRASSNER, J.; DAI, F. (1996). **VR Techniques for the Investigation of Molecule Data**. Computer & Graphics, v.20, n.2, p. 207-217, 1996.
- HALUCK, R.; WEBSTER, R.; SNYDER, A.; WANG, W. ZIMMERMAN, D.; MOHLER, B.; HUTCHENS, D. (2000). **A Haptic Surgical Suturing Simulator**. Online: <http://cs.millersv.edu/haptics/suture.htm>. Acesso em maio de 2000.
- HANCOCK, D. (1995). **Viewpoint: Virtual Reality in Search of Middle Ground**, IEEE Spectrum, 32(1):68, Jan 1995.
- HODGES, L. F.; ROTHBAUN, B. O.; OPDYKE, D. G. J.; WILLIFORD, J. S.; NORTH, M. M. (1995). **Virtual Environments for Treating the Fear of Heights**. IEEE Computer, v.28, n.7, p. 27-34, julho de 1995.
- IEEE Committee Report, **Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies**. IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-92, december 1973, p. 1904-1955.

- JACOBSON, I. (1998). **Objectory is the unified process. Component Strategies** v.1, n. 10, Apr., 1998 p. 67-72.
- JACOBSON, L. (1991). **Virtual Reality: A Status Report**, AI Expert, pp. 26-33, Aug. 1991.
- JACOBSON, L. (1994). **Realidade Virtual em Casa**. Rio de Janeiro, Berkeley.
- JANOWSKI A., SAWICKI P., SZULWIC J., (2005), "**Advanced 3D Visualization of an Architectural Object in the OpenGL Standard**", Proceedings of the ISPRS working group V/5 'Panoramic Photogrammetry Workshop' Berlin, Germany, 24-25.02.2005, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISSN 1682-1750, Vol. XXXVI-5/W8.
- JIANG GUO, ZHAOHUI LI, YITAO CHEN, (2002), "**Virtual environment conception for CBM of hydro-electric generating units.**" In Proc 2002, International conference on power system technology, vol. 3, pp. 1957-1961.
- JIANG GUO, ZHAOHUI LI, YITAO CHEN, (2003), "**Visualization of a Hydro-electric Generating Unit and Its Applications.**" In Proc 2003, International conference on system, man and cybernetics, vol. 3, pp. 2354-2359.
- JUNIOR, W. B.; BARREIROS, J. A. L.; COSTA JUNIOR, C. T.; FERREIRA, A. M. D. (2005). **Controle Fuzzy Aplicado à Melhoria da Estabilidade Dinâmica em Sistemas Elétricos de Potência**. In: Revista Controle & Automação/ Vol. 16 no. 2/Abril, Maio e Junho 2005.
- KALAWSKY, R. S. (1993). **The Science of Virtual Reality and Virtual Environments**. Addison Wesley.
- KIMURA, M. (2005). **Modelagem do Comportamento Térmico dos Anéis de Desgaste de uma Turbina Francis Operando em Compensador Síncrono**. Dissertação de Mestrado. Agosto de 2005. Universidade Federal do Paraná.

- KIRNER, C. & TORI R. (2004). **Realidade Virtual: Conceitos e Tendências** – Livro do Pré-Simpósio, VII Symposium on Virtual Reality. São Paulo: Mania do Livro, 2004.
- KIRNER, C.; TORI, R. (2006). **Fundamentos e Tecnologia de Realidade Virtual e Aumentada**: Belém - PA, Apostila do Pré Simpósio VIII SVR. pp 198-201.
- KIRNER, C. (1998). “**Sistemas de Realidade Virtual**”. Grupo de Pesquisa em Realidade Virtual. Departamento de Computação. Universidade Federal de São Carlos. Disponível: <http://www.dc.ufscar.br/~grv/tutrv.htm> [janeiro 1998].
- KRUEGER, M.W. (1991). **Artificial Reality II**, Addison-Wesley, Reading, MA, 1991.
- KUNDUR, P. (1994). **Power system stability and control**, Electric Power Research Institute McGraw-Hill.
- LOPES, A. C.; NUNES, M. V. A.; MOUTINHO, P. R.; RIBEIRO FILHO, M.; ALHO, P. N. (2006). **Utilizando Técnicas de Realidade Virtual para o Desenvolvimento de Programa Computacional que objetiva a Representação de uma Unidade Hidrogeradora Integrada a um Sistema Elétrico**. In: XVI Congresso Brasileiro da Automática, 03 a 06 de Outubro, Centro de Convenções da Bahia, Bahia, Brasil, p.p. 2748-2753.
- LOPES, A. C.; NUNES, M. V. A.; MOUTINHO, P. R.; RIBEIRO FILHO, M.; ALHO, P. N. (2007). **Utilizando Técnicas de Realidade Virtual para o Desenvolvimento de Programa Computacional que objetiva a Representação da Partida, Parada e Funcionamento de uma Unidade Hidrogeradora Integrada a um Sistema Elétrico**. In: XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Grupo I – Grupo de Geração Hidráulica, 14 a 17 de Outubro, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.
- MACHADO, L.S. (1995). **Conceitos Básicos da Realidade Virtual**. Relatório Técnico. 1995. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. [INPE-5975-PUD/0-25].

- MACHADO, L. S. (1997). **A Realidade Virtual em Aplicações Científicas**. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (INPE-6389-TDI/605).
- MACHADO, L. S. (2003). **A Realidade Virtual no Modelamento e Simulação de Procedimentos Invasivos em Oncologia Pediátrica: Um Estudo de Caso no Transplante de Medula Óssea**. Tese de Doutorado. Março de 2003. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MEIGUINS, B. S. (1999). Laboratório **Virtual para Experiências de Eletrônica**. In: WRV'99 - Workshop Brasileiro de Realidade Virtual, 1999
- MEIGUINS, B. S. (2002). **Laboratório Virtual para Auxílio ao Ensino de Circuitos Elétricos**. Dissertação de Mestrado. Dezembro de 2002. Universidade Federal do Pará.
- MINE, M. (1995). **ISAAC: A Virtual Environment Tool for the Interactive Construction of Virtual Worlds**. UNC Chapel Hill Computer Science Technical Report TR95-020, 1995.
- NETTO, A. V.; MACHADO, L.S.; OLIVEIRA, M. C. F. (2002). **Realidade Virtual: Definições, Dispositivos e Aplicações**. Tutorial. Revista Eletrônica de Iniciação Científica da SBC. Março de 2002. Ano II, v. II, n.2, ISSN 1519-8219.
- NETTO, A. V.; DENIPOTE, J. G.; CATERIANO, P. S. H. (2005). **Interface 3D para manipulação de dados em redes de distribuição de energia elétrica**. Revista Infocomp, Lavras - MG, v. 4, n. 4, 2005.
- NUNES, M. V. A.; RIBEIRO FILHO, M.; VIEIRA, J. P. A.; BARATA, P. N. A.; ROCHA, M. G. **Laboratório Virtual de um Sistema Eólico: Uso de Técnicas de Realidade Virtual para Representação de um Aerogerador Integrado em um Sistema Elétrico**, VI Conferência Internacional de Aplicações Industriais – Induscon, Recife - PE, 2006.

- NUNES, M. V. A. (2003). **Avaliação do Comportamento de Aerogeradores de Velocidade Fixa e Variável Integrados em Redes Elétricas Fracas**. Tese De Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Dezembro, 2003.
- OLIVEIRA, V. R.; MASSAUD, A.; AVIZ, C. A.; LANA, J. (2005). **Otimização do regulador de velocidade da UHE Tucuruí para aumento do intercâmbio entre as regiões norte e nordeste do SIN**. In: XVIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 16 a 21 outubro, Curitiba-Paraná, grupo IV. 2005.
- OLIVEIRA, R. V. (2006). **Projeto de Controladores de Amortecimento para sistemas Elétricos de Potencia**. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- PINHO, M. S. (1998). **Uma Introdução à Realidade Virtual**. In: Escola Regional de Informática, 1998, Belo Horizonte. Escola Regional de Informática. Belo Horizonte : Sociedade Brasileira de Computação.
- PIMENTEL, K. & TEIXEIRA, K. (1995). **Virtual Reality - through the new looking glass**. 2.ed. New York, McGraw-Hill.
- RHEINGOLD, H. (1991). **Virtual Reality**. New York, Touchstone.
- PRESSMAN, R. L. (1995). **Software Engineering**. Ed. Makron Books.
- SÁ, A. G. & ZACHMANN, G. (1999). **Virtual Reality as a Tool for Verification of Assembly and Maintenance Process**. Computer & Graphics Journal, vol. 23, num.3.pp.389-403. Ed. Elsevier Science Ltd.
- SCHUTYSER, F.; CLEYNENBREUGEL, J.; SCHOENAERS, J.; MARCHAL, G.; SUETENS, P. A. (1999) **Simulation Environment for Maxillofacial Surgery Including Soft Tissue Implications**. MICCAI'99 Proceedings. Lecture Notes in Computer Science, n. 1679, p. 1210-1217. Springer, 1999.

- SIMONE, A. G. (2003). **Centrais e aproveitamentos hidrelétricos**. São Paulo, Editora Érica, 2003.
- SOUZA, Z.; FUCHS, R. D.; SANTOS, A. H. M. (1983). **Centrais Hidro e Termelétricas**. Edgar Blücher, Itajubá - MG.
- STATE, A.; LIVINGSTON M.; GARRETT W.; HIROTA G.; WHITTON M.; PISANO E. e FUCHS E. (1996). **Technologies For Augmented Reality Systems: Realizing Ultrasound- Guided Needle Biopsies**. In Proc. Siggraph'96, Páginas 439–446.
- TEAL, C. & SORENSEN, D. (2001). **Condition based maintenance**. In: Proc. 2001 Digital Avionics Systems, DASC. 20<sup>th</sup> Conf., pp. 461-467.
- TORI, R.; KIRNER, C. SISCOOTTO, R. (2006). "**Fundamentos e Tecnologia de Realidade Virtual e Aumentada**". Apostila do Pré-Simpósio VIII Symposium on Virtual Reality, Belém – PA, 02 de Maio de 2006.
- VINCE, J. (1995). **Virtual Reality Systems**. New York, Addison-Wesley, 1995.
- WATKINS, C. & MARENKA, S. (1994). **Virtual Reality Excursions: With Programs in C**. San Diego, CA. Academic Press.
- WEBSTER, R.; ZIMMERMAN, D.; MOHLER, B.; MELKONIAN, M.; HALUCK, R. (2001). **A Prototype Haptic Suturing Simulator**. Medicine Meets Virtual Reality. Studies in Health Technology and Informatics, n. 81, p. 567-569. IOS Press, 2001.
- ZHENG-PING, N.; YOU-LIANG, Z.; HUI-FEN, W. (2003). **Establishment of Reconfigurable 3D Virtual Machining Environment**. In: 2nd CENNET Workshop, Shenzhen, PRC, 10-12 October 2003.
- ZHANG HONGHUO; WU WEI; DONG QIGUO. (2002). **The practice of condition based maintenance of electric equipment**. Jiangsu Electrical Engineering, Vol.21, No. 1, 2002, pp. 56 8.