

UTILIZANDO TÉCNICAS DE REALIDADE VIRTUAL PARA O DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA COMPUTACIONAL QUE OBJETIVA A REPRESENTAÇÃO DE UMA UNIDADE HIDROGERADORA INTEGRADA EM UM SISTEMA ELÉTRICO

ANDREY C. LOPES, MARCUS V. A. NUNES, PAULO R. M. VILHENA, MANOEL RIBEIRO F^o

*Núcleo de Energia, Sistemas e Comunicação, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação,
Universidade Federal do Pará*

Av. Augusto Corrêa, s/n, Guamá, CEP: 66075-900 Caixa Postal: 8619 Belém-Pará-Brasil

*E-mails: andreycl@ufpa.br
mvan@ufpa.br
prmoutinho@click21.com.br
mrf@ufpa.br*

Abstract— This work seeks the development of a virtual tool of aid in the teaching and training of the professionals of the sector of operation of a hydroelectric plant, that it allows the visualization of an hydroelectric unit interlinked to the power system. The three-dimensional environment that it represents the dynamics of the hydroelectric unit has been built with the API Java 3D. The user can execute the program using parameters of the system, and to carry them, in that way, could observe the behavior of the system in real time, due to load variations and fault in the electric system.

Keywords— Virtual Reality, Electric Power System, Dynamic Simulation, Object-Oriented Programming

Resumo— Este trabalho visa primordialmente o desenvolvimento de uma ferramenta virtual de auxílio no ensino e treinamento de profissionais do setor de operação de uma usina hidroelétrica, que permite a visualização de uma unidade hidrogeradora (UHG) interligada a um sistema de potência. O ambiente tridimensional que representa a dinâmica da UHG foi construído utilizando-se a biblioteca GLScene para Delphi. O usuário pode executar o programa utilizando parâmetros do sistema, e carregá-los, dessa forma, podendo observar o comportamento do sistema em tempo real, diante de variações de carga e de faltas no sistema elétrico.

Palavras-chave— Realidade Virtual, Sistemas Elétrico de Potência, Simulação Dinâmica, Programação Orientada a Objeto.

1 Introdução

Existe o consenso definitivo de que a Realidade Virtual (RV) pode ajudar efetivamente no processo de iteração ensino-aprendizagem (Burdea, G. & Coiffet, P., 1994). Este trabalho pretende utilizar as potencialidades provenientes da RV para auxiliar o ensino e o treinamento de profissionais da área de operação de uma usina hidroelétrica.

Durante a operação da usina, o controle primário de velocidade da turbina, 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.

Para uma turbina tipo Francis, o controle é exercido sob a forma de aletas móveis, chamadas coletivamente de distribuidor, por onde a água flui antes de alcançar o rotor da turbina. A posição do distribuidor pode fazer com que a água tenha uma velocidade tangencial quando passa pelo rotor da turbina. Tal controle é feito mediante a alteração da posição do distribuidor. As comportas do distribuidor são defletidas simultaneamente através da rotação de um anel de comando no qual cada comporta está articulada.

Diante desse contexto reporta à necessidade de desenvolvimento de ferramentas capazes de visualizar o funcionamento de uma unidade

hidrogeradora (UHG) em tempo real. Partindo deste princípio, apresentamos neste artigo uma proposta, para visualização de uma usina hidroelétrica integrada em um sistema elétrico de potência (SEP), com uma abordagem Orientada a Objetos (OO), através de um ambiente virtual 3D.

Além da facilidade citada acima, o ambiente também proporciona ao usuário, informações adicionais como a visualização em tempo real das variáveis da UHG, por exemplo, potência e tensão gerada.

Também serão descritas algumas considerações teóricas sobre os métodos de solução utilizados no sistema dinâmico, fazendo uma breve abordagem de dois importantes métodos de integração, utilizados na solução das equações diferenciais dos modelos.

2 Estrutura Computacional

O sistema foi todo implementado usando o ambiente de desenvolvimento e linguagem DELPHI, sendo este Orientada a Objetos (OO), e os componentes Open Source GLScene. GLScene é uma biblioteca 3D baseada em OpenGL para Delphi. Fornece componentes visuais e objetos permitindo a descrição (grafo de cena) e renderização das cenas 3D. GLScene, além de ser um envoltório de OpenGL, é também um conjunto de classes fundamentado no desenvolvimento rápido da aplicação. GLScene permite que você projete e renderize rapidamente as

cenar 3D sem ter que aprender todas as particularidades de OpenGL.

A Fig.1 apresenta o diagrama de módulos da arquitetura computacional do sistema. Com o objetivo de tornar as figuras mais realísticas, a UHG e suas peças mecânicas foram modeladas em um programa CAD e depois carregadas para o ambiente virtual.

A modelagem eletromecânica da dinâmica da UHG foi implementada na linguagem DELPHI.

O módulo gráficos foi desenvolvido usando a classe TChart nativa do DELPHI. Onde este é responsável por gerar os gráficos das variáveis de maior importância do sistema, tais como tensão gerada, velocidade do eixo do rotor do gerado, entre outras.

A interação entre os módulos da modelagem dinâmica e o ambiente virtual 3D, é responsável por toda dinâmica e por todo realismo do sistema, pois o primeiro resolve as equações do gerador e da turbina Francis, a cada amostra, e repassa os valores das variáveis para as animações no Ambiente Virtual 3D, fazendo com que o sistema no ambiente comporte-se como uma UHG real.

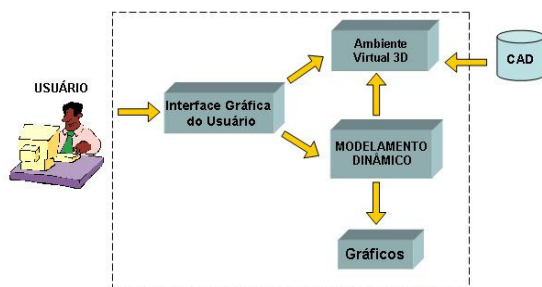


Figura 1. Diagrama de módulos.

3 Modelagem

O 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 (1), e um conjunto de equações algébricas dos outros componentes do sistema, tais como: transformadores, linhas de transmissão, capacitores, reatores e carga, representadas através da equação (2).

$$\dot{\bar{x}}(t) = f(\bar{x}(t), \bar{y}(t), \bar{u}(t)) \quad (1)$$

$$\bar{y}(t) = g(\bar{x}(t), \bar{u}(t)) \quad (2)$$

Onde $\bar{x}(t)$ são as variáveis de estado, $\bar{y}(t)$ são as variáveis de saída e $\bar{u}(t)$ as variáveis de entrada. A equação (1) depende também das variáveis de saída calculadas em (2), isto pode ser justificado lembrando-se que as correntes injetadas são

calculadas, através das equações da rede, e que os valores destas correntes, são usados no cálculo das tensões internas da máquina, que são 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 qualquer método numérico.

3.1 Modelo do Gerador Síncrono

Para a representação do gerador síncrono nos estudos de estabilidade transitória, são desprezados os transitórios do estator. Este procedimento é essencial para compatibilizar a modelagem do gerador com o 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 (Arrillaga, I. & Arnold, C. P., 1984):

$$\dot{E}_q'' = \frac{1}{T_{d0}''} [-E_q'' + E_q' + (x_d' - x_d'') \cdot i_d] \quad (3)$$

$$\dot{E}_d'' = \frac{1}{T_{q0}''} [-E_d'' - (x_q - x_q'') \cdot i_q] \quad (4)$$

$$\dot{E}_q' = \frac{1}{T_{d0}'} [-E_q' + E_{fd} + (x_d - x_d') \cdot i_d] \quad (5)$$

$$E_d' = v_d + r_a \cdot i_d + x_q'' \cdot i_q \quad (6)$$

$$E_q'' = v_q + r_a \cdot i_q - x_d'' \cdot i_d \quad (7)$$

Onde:

- E_d'' - Tensão subtransitória do eixo de quadratura;
- 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.

As equações dinâmicas do rotor da máquina são dadas por:

$$\dot{\delta} = 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot (\omega - \omega_0) \quad (8)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2 \cdot H} \cdot [T_m - T_e + D \cdot (\omega - \omega_0)] \quad (9)$$

Onde:

- δ - Tensão subtransitória do eixo direto;
- ω - Frequência do gerador;

- ω_0 - Frequência nominal do gerador;
- D - Fator de amortecimento;
- H - Constante de inércia do gerador;
- T_m - Torque mecânico;
- T_e - Torque elétrico.

Na Fig. 2 tem-se um diagrama esquemático resumido do modelo transitório do gerador síncrono, conectado a uma rede de transmissão, onde mostra o gerador síncrono em conjunto com seus controles atuando, integrado ao SEP.

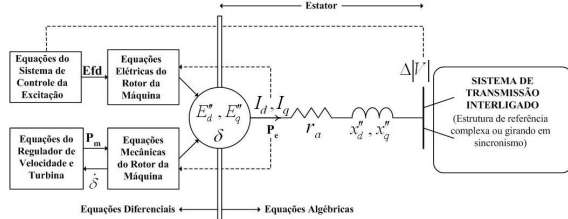


Figura 2. Diagrama esquemático do modelo transitório do gerador síncrono, conectado a uma rede de transmissão.

3.2 Modelo da Turbina e Reguladores de Velocidade e Tensão

Implementou-se a simulação eletromecânica da usina utilizando-se modelos sugeridos em (Kundur, P., 1994) para a turbina, regulador de velocidade e tensão, conforme as Fig. (1) e (2).

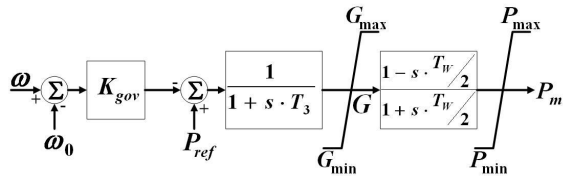


Figura 3. Modelo da Turbina e Regulador de Velocidade.

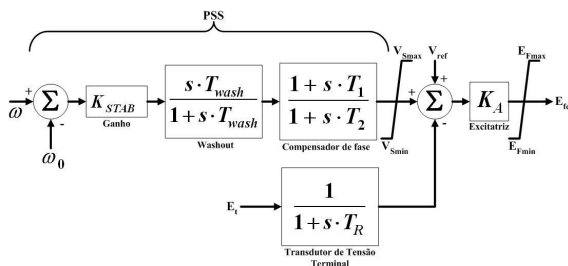


Figura 4. Modelo do Regulador Automático de Tensão e PSS.

Os parâmetros para os reguladores das Fig. 3 e 4 são dados pela Tabela 3 do apêndice.

4 Métodos de Integração

Os métodos de integração podem ser divididos nas principais categorias: explícito ou implícito e de passo fixo o variável. Nos métodos explícitos, as fórmulas de integração são aplicadas diretamente

para cada uma das equações diferenciais individuais a serem resolvidas. Na integração implícita, as equações diferenciais são algebrizadas e as equações resultantes são resolvidas simultaneamente como um conjunto. Este método, apesar de mais complicado, tem maior estabilidade numérica.

Métodos de passo fixo não usam informação sobre a solução anterior para o início de cada passo de integração. Portanto, eles são auto-iniciáveis, o qual é conveniente na presença de descontinuidades. Runger-Kutta é a mais famosa dessas classes de métodos. Os métodos de passo variável requer o armazenamento de valores prévios das variáveis e/ou suas derivadas, sendo portanto, mais eficientes (Stott, B., 1979).

Neste trabalho adotou-se dois tipos de método de integração na implementação das simulações: Runger-Kutta de quarta ordem (método explícito) e Trapezoidal (método implícito).

4.1 Métodos Implícitos de Integração (Trapezoidal)

Os métodos de integração implícitos usam uma interpolação de funções para uma expressão sob uma integral. A interpolação implica que as funções devem passar através dos pontos ainda desconhecidos no instante (Kundur, P., 1994).

A aplicação desse método de solução numérica de equações diferenciais, sempre resulta em uma equação algébrica que depende do seu resultado anterior, ou seja, trata-se de equações algébricas recursivas. As equações algébricas recursivas são chamadas equações de diferenças (uma analogia às equações diferenciais).

Os métodos de solução usados neste trabalho necessitam de apenas um resultado imediatamente anterior para serem calculados (equações de diferenças de primeira ordem).

A solução passo a passo da equação (1) pode ser expressa na forma integral.

$$\bar{x}(t+h) = \bar{x}(t) + \int_t^{t+h} f(\bar{x}(\tau), \bar{y}(\tau), \bar{u}(\tau)) \cdot d\tau \quad (10)$$

As fórmulas para equivalentes discretos são particularmente simples e convenientes quando expressadas em forma de variáveis de estado e usadas no formado matricial, adequado para uso de computadores digitais.

Partindo-se das equações (1) e (2), define-se um sistema de equações diferenciais na forma de espaço de estados conforme as equações (11) e (12).

$$\dot{\bar{x}}(t) = A \cdot \bar{x}(t) + B \cdot \bar{u}(t) \quad (11)$$

$$\bar{y}(t) = C \cdot \bar{x}(t) + D \cdot \bar{u}(t) \quad (12)$$

A técnica de integração implícita usa interpolação de funções para a expressão abaixo da

integral na equação (10). Portanto, a equação (11) pode ser expressa como:

$$\bar{x}(t+h) = \bar{x}(t) + A \cdot \int_t^{t+h} \bar{x}(\tau) \cdot d\tau + B \cdot \int_t^{t+h} \bar{u}(\tau) \cdot d\tau \quad (13)$$

O esquema de integração implícito mais simples é o método trapezoidal (Dommel, H. W. & Sato, N., 1972). Este se baseia na definição de que $\bar{x}(t)$ e $\bar{u}(t)$ variam linearmente sob um intervalo de t até $t+h$. Então a equação (13) se torna:

$$\begin{aligned} \bar{x}(t+h) = \bar{x}(t) + \frac{h}{2} \cdot A \cdot [\bar{x}(t) + \bar{x}(t+h)] + \\ + \frac{h}{2} \cdot B \cdot [\bar{u}(t) + \bar{u}(t+h)] \end{aligned} \quad (14)$$

Isolando os termos $(t+h)$ e definindo uma nova variável de estado, tem-se:

$$\begin{aligned} \sqrt{h} \cdot \bar{w}(t+h) = \left(I - \frac{h}{2} \cdot A \right) \cdot \bar{x}(t+h) + \\ - \frac{h}{2} \cdot B \cdot \bar{u}(t+h) \end{aligned} \quad (15)$$

A equação (15) pode ser reescrita em termo de t , onde isolando-se a variável de estado $\bar{x}(t)$ e substituindo-se nas equações (11) e (12) tem-se:

$$\bar{w}(t+h) = \Phi \cdot \bar{w}(t) + \Gamma \cdot \bar{u}(t) \quad (16)$$

$$\bar{y}(t) = H \cdot \bar{w}(t) + J \cdot \bar{u}(t) \quad (17)$$

Onde as matrizes Φ , Γ , H e J são dadas em função das matrizes A , B , C e D , conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Relação de Transformação para as Novas Matrizes de Estado

Φ	$\left(I + \frac{h}{2} \cdot A \right) \cdot \left(I - \frac{h}{2} \cdot A \right)^{-1}$
Γ	$\sqrt{h} \cdot \left(I - \frac{h}{2} \cdot A \right)^{-1} \cdot B$
H	$\sqrt{h} \cdot C \cdot \left(I - \frac{h}{2} \cdot A \right)^{-1}$
J	$D + \frac{h}{2} \cdot C \cdot \left(I - \frac{h}{2} \cdot A \right)^{-1} \cdot B$

4.2 Métodos Explícitos de integração (Runge-Kutta de Quarta Ordem)

Nos métodos de Integração explícitos, o valor da variável dependente, \bar{x} , em qualquer valor de t é calculado conhecendo-se o valor de \bar{x} do passo

anterior. Estes métodos são de fácil implementação para solução de sistemas complexos de equações de estados.

Uma limitação importante dos métodos de integração explícitos é que o comprimento do passo de tempo de integração h está restrito a menor constante de tempo do sistema (Kundur, P., 1994).

Entre as metodologias de integração numéricas mais utilizadas estão os métodos de Runge-Kutta, que é o método mais empregado em simuladores dinâmicos para a integração das equações diferenciais.

Um exemplo bastante conhecido é o método de Runge-Kutta de quarta ordem. Neste método são considerados os termos da série de Taylor até a quarta derivada, apresentando um erro de ordem h^5 (Kundur, P., 1994). A expressão geral na determinação do valor de \bar{x} no passo de integração $(n+1)$ é dada pela equação.

$$\bar{x}_{n+1} = \bar{x}_n + \frac{1}{6} \cdot (k_1 + 2 \cdot k_2 + 2 \cdot k_3 + k_4) \quad (18)$$

Onde:

$$k_1 = h \cdot f(\bar{x}_n, t_n) \quad (19)$$

$$k_2 = h \cdot f\left(\bar{x}_n + \frac{k_1}{2}, t_n + \frac{h}{2}\right) \quad (20)$$

$$k_3 = h \cdot f\left(\bar{x}_n + \frac{k_2}{2}, t_n + \frac{h}{2}\right) \quad (21)$$

$$k_4 = h \cdot f(\bar{x}_n + k_3, t_n + h) \quad (22)$$

5 Resultados

O sistema é formado basicamente por uma interface RV, formado pelo painel principal, onde tem-se uma barra vertical de botões, com funcionalidades específicas e uma barra de menu.

A interface RV, é a default do sistema, pois é responsável por exibir o ambiente virtual e todas as possibilidades de visão e interação com o mesmo.

A Fig. 5 Mostra uma visão do ambiente virtual, onde pode-se observar uma turbina Francis com suas peças móveis, durante a operação.

As partes móveis são animadas, regidas pela dinâmica eletromecânica do conjunto Turbina/Gerador, onde conforme o evento a simular, uma determinada contingência poderia alterar dinamicamente os valores da velocidade do rotor, torque mecânico, abertura do distribuidor e tensão terminal.

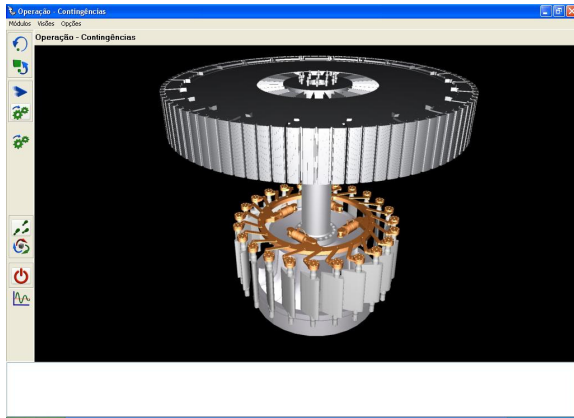


Figura 5. Interface RV para a turbina com rotor do gerador, pré-distribuidor, palhetas diretrizes e servomotores.

Na barra vertical de botões da interface RV, destaca-se o botão contingência, conforme mostra a Fig. 6. Ao clicar neste botão, é habilitada uma janela para a interface contingência conforme a Fig. 8.

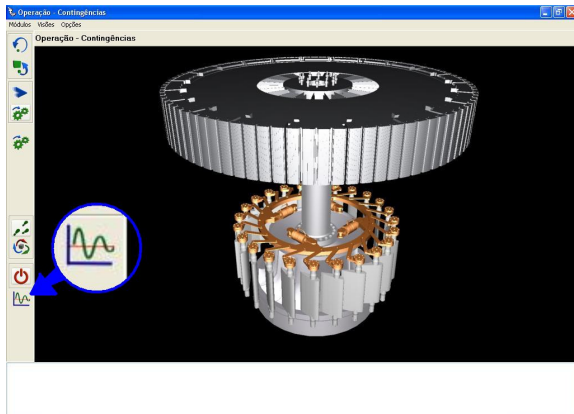


Figura 6. Interface RV, destacando o botão contingência.

Para fins de simulação dinâmica, a usina será representada por um equivalente dinâmico entre as várias unidades geradoras que compõem tal usina.

A topologia da rede adotada, representado a usina interligada a um barramento infinito, é mostrada na Fig. 6, conforme (Kundur, P., 1994).

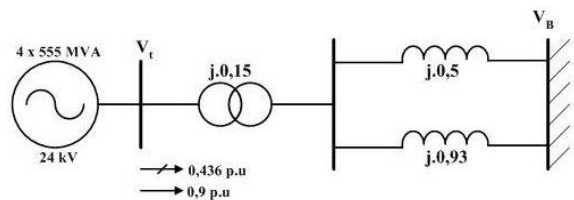


Figura 7. Topologia da rede.

Para o estudo de caso em questão, a contingência considerada será um curto-circuito na barra terminal do gerado.

Os resultados da simulação, para o estudo de caso abordado, podem ser observados nos gráficos das Figuras 8 e 9, onde aplicou-se um curto-circuito com tempo de duração de 0,01 seg.

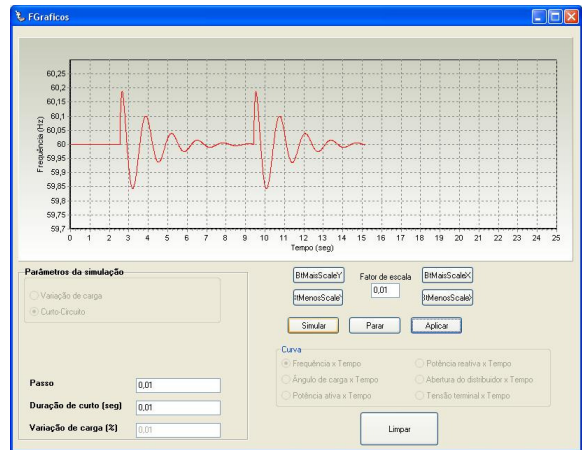


Figura 8. Variação de frequência no gerador.



Figura 9. Variação da tensão terminal no gerador.

A interface contingência possui o componente gráfico onde são mostradas as oscilografias do transitório da unidade geradora. A parte inferior mostra um painel onde o usuário entra com os parâmetros da simulação, tais como tempo inicial da contingência, tempo final da simulação e passo de integração. Dois botões de rádio habilitam o tipo de contingência, ou seja, um curto circuito no terminal da máquina ou degrau de carga.

Conforme a contingência habilitada pelos botões de rádio, um campo de texto é habilitado para tal contingência, sendo o tempo de duração de curto circuito ou percentual de variação de carga. Em seguida vem o botão simular, onde inicia a simulação. Ao lado tem os botões com as opções de grandezas eletromecânicas a serem mostradas graficamente.

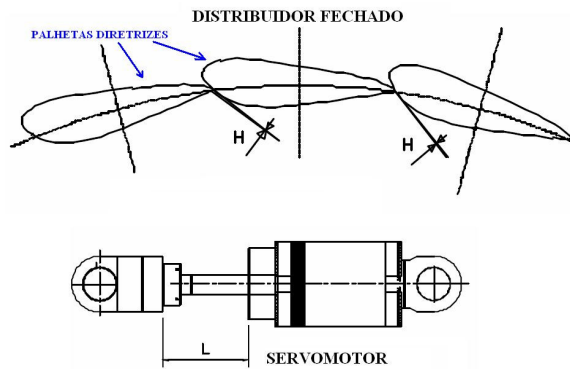


Figura 6. Partes móveis do distribuidor da turbina.

Observando-se os gráficos das Fig. 8 e 9, nota-se uma queda na potência reativa devido ao afundamento de tensão provocado pelo curto circuito no instante da falta.

Durante a simulação, a animação dos objetos mostrados no ambiente virtual da Fig. 5 será mostrada pelo giro do rotor da turbina, movimento das palhetas diretrizes do distribuidor, e anéis de regulação acoplados aos quatro servomotores na parte superior do distribuidor.

Tem-se na Fig. 10 um esquema das peças animadas no ambiente virtual, pela atuação do regulador de velocidade, durante a simulação.

6 Conclusões

Este trabalho abordou a implementação de uma ambiente virtual de uma turbina hidráulica, especificamente desenvolvido para um sistema dinâmico de uma unidade hidrogeradora interligada a um sistema elétrico de potência. A construção do ambiente virtual tridimensional representando a turbina hidráulica faz parte do interesse de desenvolver um laboratório virtual de treinamento de profissionais e estudantes do setor energético.

Foi mostrado que o ambiente virtual desenvolvido possibilita ao usuário visualizar a turbina, em tempo real, observando o comportamento dinâmico da unidade hidrogeradora, tornando possível observar certas características do sistema, que só seriam observadas através de gráficos e simulações. O ambiente também proporcionou ao usuário a visualização de informações das variáveis do sistema ao longo do tempo, como por exemplo, velocidade do eixo do gerador, tensão gerada, entre outras.

Agradecimentos

O autor agradece ao Grupo de Sistemas de Energia Elétrica e Instrumentação (GSEI) e a CAPES, pela infra-estrutura dada para elaboração da pesquisa desse trabalho.

Referências Bibliográficas

- Arrillaga, I. e Arnold, C. P. (1984). Computer modeling of electrical power systems. John Wiley & Sons Ltd., p. 213.
- Andreson, P. M. e Fouad, A. A. (1977). Power system control and stability, IEEE Press, Power Systems Engineering Series, New York.
- Burdea, G. e Coiffet, P. (1994). Virtual Reality Technology, John Wiley & Sons.
- Dommel, H. W. e Sato, N. (1972). Fast transient stability solutions. *IEEE Trans. On Power App. Syst.*, vol. PAS-91, july/august 1972, p. 1643-1650.
- Manzoni, A., Silva, A. S. e Decker, I. C. (1999). Power systems dynamics simulation using object-oriented programming, *IEEE Trans. On Power Systems*, New York, vol. 14, n. 1, february 1999, p. 249-255.
- Kundur, P. (1994). Power system stability and control, Electric Power Research Institute McGraw-Hill.
- Stott, B. (1979). Power system dynamic response calculations. *IEEE Proceeding*. Vol. 67, n. 2, february 1979, p. 219-241.
- 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.
- IEEE Std. 4221.1, IEEE standard definitions for excitation system for synchronous machines, *IEEE Press*, november 1986.
- <http://www.object-refinery.com/jfreechart/> acessado em abril de 2006.

Apêndice

Tabela 2. Dados do Gerador Síncrono

x_d	1,81	x_q	1,76
x'_d	0,30	x'_q	0,65
x''_d	0,23	x''_q	0,25
T'_{d0}	8,00	T'_{q0}	1,00
T''_{d0}	0,03	T''_{q0}	0,07
r_a	0,003	H	3,50
D	0,00		

Tabela 3. Dados dos Reguladores de Velocidade e Tensão.

T_w	0,86	K_{STAB}	9,50
K_{gov}	20,0	T_{wash}	1,41
T_1	0,154	T_R	0,015
T_2	0,033	E_{Fmax}	7,0
T_3	0,50	E_{Fmin}	-6,4
K_A	20,0	V_{Smax}	-0,20
V_{Smin}	0,20		