

SISTEMA SUPERVISÓRIO DIDÁTICO PARA MONITORAMENTO DE UMA PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA

Fernanda M. de Moraes¹; Alexandre J. Pinotti²; Ana B. Knolseisen³; Antônio F. L. Nogueira⁴

^{1,2,4} Universidade do Estado de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Elétrica
Campus Universitário Prof. Avelino Marcante s/n, Bom Retiro
89223-100, Joinville, SC

¹fmendesdemorais@gmail.com; ²ajpinotti@gmail.com; ⁴antonio.flavio.nogue@terra.com.br

³ Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina
Rua Pavão, 1.337
89220-200, Joinville, SC
anabarbara@cefetsc.edu.br

Resumo: Este artigo tem como objetivo apresentar os fundamentos que envolvem a geração de energia elétrica através de uma PCH (Pequena Central Hidrelétrica), identificando as principais variáveis envolvidas no processo. Tais variáveis são adaptadas a um sistema de monitoramento de uma PCH com interface gráfica amigável, baseado no software Elipse E3®. O projeto de iniciação científica apresenta na sua aplicação acadêmica, o intuito de utilizar o aplicativo desenvolvido para ensino em disciplinas do curso de engenharia elétrica.

Palavras-chave: Geração de energia hidroelétrica, Monitoramento, PCH, Sistema SCADA, Software de simulação.

1. INTRODUÇÃO

Para produzir com mais flexibilidade, rapidez, qualidade e com o menor custo, as empresas têm realizado grandes investimentos na melhoria de seus processos produtivos, de forma a contribuir diretamente para a ampliação das pesquisas e desenvolvimento de produtos e serviços voltados para a automação de processos em geral, conforme GAIDZINSKI (2003). Contudo, o primeiro passo para a automação de um processo é o seu monitoramento.

Segundo GRANDI (2000) e BERGMAN (1999), o monitoramento está basicamente relacionado à aquisição de dados, a partir de uma metodologia, para medição das condições dos equipamentos, permitindo o diagnóstico a partir da interpretação das medidas coletadas.

Em especial, no setor elétrico brasileiro a busca pela eficiência, o cenário econômico favorável e as alterações na legislação levaram ao desenvolvimento de novas metodologias de gerenciamento da energia. No setor de geração, a falta de mão-de-obra qualificada, com conhecimento técnico sobre as variáveis envolvidas no processo de geração de energia elétrica, é um dos fatores que impulsiona o crescimento da automação nesse setor. O desenvolvimento da automação e a constante evolução tecnológica, permitem que usinas sejam projetadas, para funcionarem com um mínimo de supervisão humana, conforme explicam PELICIOLO e FERGÜTZ (2005).

Do mesmo modo, houve investimento na elaboração de programas computacionais para controle dos processos envolvidos em sistemas a serem automatizados, conhecidos por *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA). A principal função de um sistema

SCADA é o monitoramento e o controle dos equipamentos em vários níveis, sendo desenvolvido para funcionar como uma interface homem-máquina (IHM) ou estação de supervisão, baseado na interligação de microcomputadores com controladores programáveis ou outros equipamentos de aquisição de dados (GAIDZINSKI (2003) e GRANDI (2000)). Sendo assim, no setor elétrico estes sistemas possuem significativa contribuição para monitoramento e controle.

No meio acadêmico, a interação dos alunos com a automação, a partir de sistemas de monitoramento, é de grande importância para seu crescimento profissional, tendo em vista a possibilidade de realização de experimentos com base em dados reais. Como atualmente, em função do aumento da demanda de energia, as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) estão sendo consideradas para suprimento de demandas extraordinárias, como horários de pico ou falhas no sistema, no caso específico da geração de energia através de uma PCH, um sistema de monitoramento permite ao aluno o conhecimento das etapas envolvidas no processo, permitindo também o contato com os mecanismos que focam a eficiência da produção.

Neste contexto, este artigo apresenta um sistema supervisório didático desenvolvido sob a plataforma Elipse E3®, para monitoramento de uma PCH levando em consideração as principais variáveis envolvidas no processo de geração de energia.

2. CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Segundo dados, de junho de 2008, da ANEEL (2008), a produção de energia elétrica no Brasil possui uma predominância Hidráulica (76,3%) e um potencial hidráulico explorado em torno de 77.143MW, conforme mostra a Figura 1. Dos empreendimentos em construção, 72,3% são de centrais hidrelétricas.

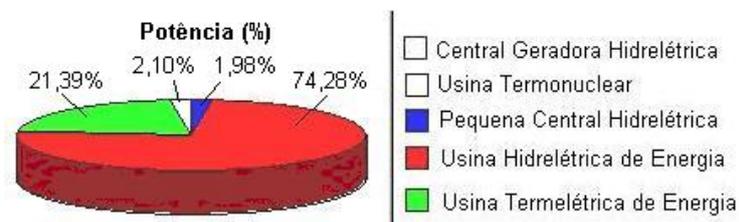


Figura 1 - Geração de Energia Elétrica no Brasil.

As centrais hidrelétricas podem ser caracterizadas de acordo com o arranjo de seus componentes. Segundo SOUZA (1992), de modo geral existem três tipos de centrais hidrelétricas: Centrais de Represamento (CHR); Centrais de Desvio (CHD) e Centrais de Derivação (CHV). Como explicam SIMONE (2000) e SCHREIBER (1978), nas centrais de represamento, a barragem represa o rio, formando grandes reservatórios de água que suprem as necessidades das turbinas, regularizam a vazão do rio e efetuam a concentração do desnível sendo que a casa de força se encontra no pé da barragem. Nas centrais de desvio, um canal aberto (túnel adutor) sai da barragem e conduz a água até chaminé de equilíbrio, a partir daí, tubulações forçadas conduzem a água até as turbinas, que se encontram na casa de força. Nas centrais de derivação, a barragem tem a função de represar um rio e, através de um canal, a água é conduzida até a encosta do vale de outro rio, onde se encontra a chaminé de equilíbrio, a tubulação forçada e a casa de força. Os principais elementos de um aproveitamento hidrelétrico que utiliza uma central de desvio são mostrados na Figura 2 (SIMONE, 2000).

Através de estudos hidrológicos é determinada a vazão normal do aproveitamento do rio, sua potência nominal, a vazão da cheia para o dimensionamento das obras de desvio e dos extravasores, além dos níveis máximos e mínimos à montante e à jusante (SOUZA, 1992).

Observa-se, na Figura 2, que as barragens (2) têm a função de reter a água, criando artificialmente um desnível local, podendo possuir vertedouro e comportas. Através da barragem é formado o reservatório superior (1) onde se encontra o nível máximo de água, também chamado de nível à montante (NM). A chaminé de equilíbrio (4) interliga o sistema de baixa pressão (3) com o de alta pressão (5).

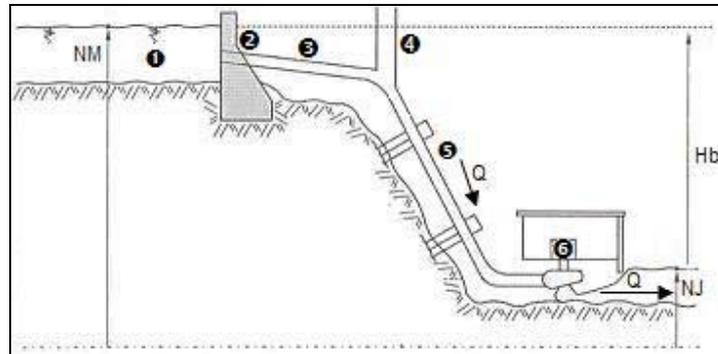


Figura 2 - Aproveitamento hidrelétrico com uma turbina de geração

Basicamente, a geração de energia hidrelétrica ocorre com as turbinas hidráulicas (6) recebendo energia de um fluxo hidráulico e convertendo essa energia mecânico-hidráulica em mecânico-motriz, disponibilizada no eixo motriz da referida turbina. O número de turbinas e seu tipo parte do critério de que a central hidrelétrica deve atender, técnica e economicamente, uma carga especificada. Além da carga, deve-se conhecer ainda a vazão Q (m^3/s) e a queda líquida H_l (m) de projeto, (SCHREIBER, 1978).

2.1. Pequenas centrais hidrelétricas - PCHs

Segundo a Resolução No. 652 da ANEEL (2003) os aproveitamentos com características de PCHs são aqueles que possuem potência entre 1 e 30MW e área inundada de até 3km², para cheia centenária. A Figura 3 apresenta a distribuição de energia elétrica no país proveniente de PCHs que representam 1,98% de toda a energia produzida pelo Brasil, ANEEL (2008).

Já em termos operacionais, as PCHs são unidades geradoras de energia elétrica que funcionam, em geral, com reservatórios mínimos ou derivações de curso d'água permanentes.

Uma PCH típica normalmente opera a fio d'água, isto é, o reservatório não permite a regularização do fluxo da água. Com isso, em ocasiões de estiagem a vazão disponível pode ser menor que a capacidade das turbinas, causando ociosidade. Em outras situações, as vazões são maiores que a capacidade de engolimento das máquinas, permitindo a passagem da água pelo vertedouro. Por esses motivos o custo da energia elétrica produzida pelas PCHs é maior que o de uma usina hidrelétrica de grande porte, onde o reservatório pode ser operado de forma a diminuir a ociosidade ou os desperdícios de água. Entretanto as PCHs são instalações que resultam em menores impactos ambientais e se prestam à geração descentralizada.

Assim, este tipo de hidrelétrica é normalmente utilizado em rios de pequeno e médio porte que, preferencialmente, possuam desníveis significativos durante seu percurso, gerando potência hidráulica suficiente para movimentar as turbinas, não necessitando da construção de barragens para tal.

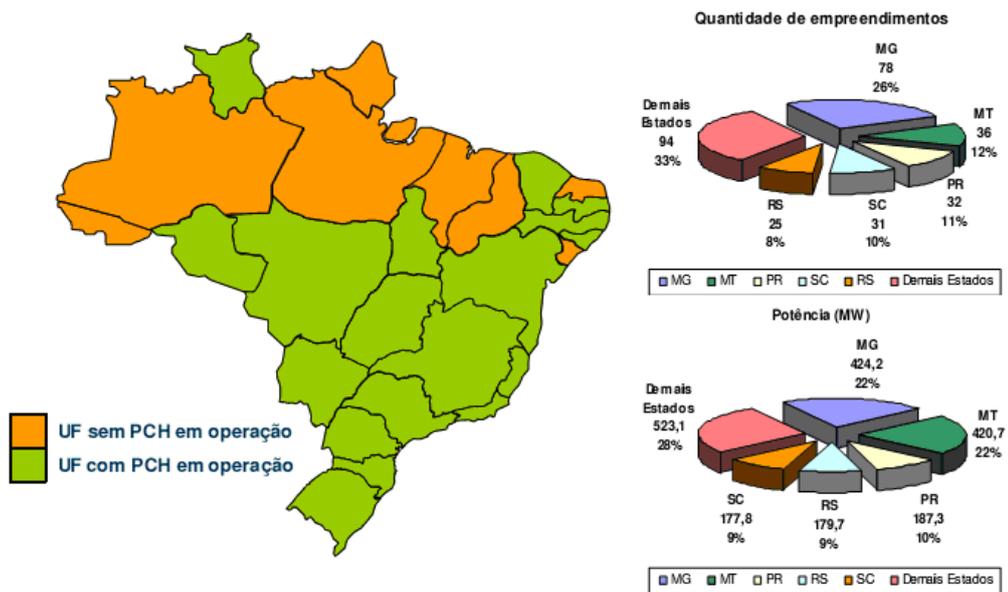


Figura 3 - PCHs no Brasil

3. CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE UMA PCH

Um aproveitamento ideal é aquele isento de perdas de qualquer natureza. Sendo assim, define-se a potência teórica de um aproveitamento como apresentado por SCHREIBER (1978) e SIMONE (2000):

$$P_t = \gamma \cdot Q \cdot H_b \text{ (kW)} \quad (1)$$

A queda bruta H_b (m), pode ser definida como a diferença entre os níveis à montante e à jusante ($NM - NJ$). A vazão é representada pela variável Q (m^3/s) e γ representa o peso específico do fluido em trânsito. Já um aproveitamento real é aquele em que as perdas de carga não podem ser desprezadas, cujo equacionamento é apresentado por SCHREIBER (1978), SIMONE (2000) e ELETROBRÁS (1999). A Equação (2) define a potência específica de um aproveitamento real, considerando as perdas de carga e de rendimento.

$$P_e = \gamma \cdot \eta \cdot Q \cdot H_l \text{ (kW)} \quad (2)$$

O rendimento η admissível da turbina e do gerador varia entre 0,75 a 0,90. A queda líquida H_l (m) é dada pela diferença entre a queda bruta H_b e o somatório das perdas de carga no canal adutor, no canal de fuga e na tubulação, como apresentado na Equação (3).

$$H_l = H_b - \sum \text{Perdas} \text{ (m)} \quad (3)$$

A energia cinética ou potencial da água dos rios e lagos que se concentra nos aproveitamentos hidrelétricos é denominado potencial hidráulico. Como visto anteriormente, este potencial é transformado em energia mecânica e, finalmente, em energia elétrica. Segundo SCHREIBER (1978), esta energia elétrica potencial medida nos terminais do gerador é demonstrada na Equação (4), onde V_{ol} (m^3) representa o volume acumulado.

$$E = \frac{\eta}{367} \cdot V_{ol} \cdot H_l \text{ (kWh)} \quad (4)$$

3.1. Perdas de carga

Para o cálculo efetivo da potência a ser instalada na PCH, deve-se determinar o valor das perdas de carga, que podem ser divididas em: perdas no canal de aproximação, perdas na grade da tomada d'água, perdas por atrito em canais e perdas em conduto sob pressão.

Na prática, independente do tipo de PCH, são utilizadas as mesmas formas de cálculo. De forma geral, as perdas de carga h (m), podem ser estimadas pelo produto do coeficiente de perda de carga k (calculado para cada caso) pela energia cinética do escoamento, onde, V (m/s) representa a velocidade do escoamento e g é a aceleração da gravidade (m/s^2), conforme apresentado pela ELETROBRÁS (1999).

$$h = k \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (\text{m}) \quad (5)$$

Perdas de carga no canal de aproximação (h_{ca})

A perda de carga no canal de aproximação pode ser estimada pela Equação 6, onde o coeficiente de forma do canal de aproximação k_{ca} varia entre 0,01 e 0,1.

$$h_{ca} = k_{ca} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (\text{m}) \quad (6)$$

Perda na Grade da Tomada d'água (h_g)

A perda de carga na grade da tomada d'água é estimada através da fórmula de Kirshmer:

$$h_g = k_g \cdot \frac{V_g^2}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{e_1}{e_2} \right)^{4/3} \cdot \text{sen} \theta \quad (\text{m}) \quad (7)$$

Para tanto é necessário identificar a espessura ou diâmetro das barras (e_1), o espaçamento entre as barras (e_2), a inclinação da grade (θ), a velocidade junto à grade (V_g) e o coeficiente de perda de carga (k_g), cujo valor depende das dimensões da grade, como exemplificado na Tabela 1, sendo b o comprimento das barras.

Tabela 1 - Coeficiente de Perda na Grade

Tipo de Barras	e_1/b	k_g
Retangulares	≥ 5	2,42
Circulares	≥ 5	1,79

Perda em canais (h_a)

A perda de carga em canais de seção uniforme com escoamento em superfície livre, sem curvas acentuadas (em cotovelo) é reduzida à perda de carga devido ao atrito (h_a), onde, L é o comprimento do canal (km) e S é a declividade da linha de energia (m/km):

$$h_a = L \cdot S \quad (\text{m}) \quad (8)$$

A declividade S é obtida a partir da Fórmula de Chézy, apresentada na equação (9),

$$V = C \cdot \sqrt{R_h \cdot S} \quad (\text{m/s}) \quad (9)$$

onde, V é a velocidade média no canal (m/s), R_h é o raio hidráulico (m), que é dado pela relação entre a área molhada e o perímetro molhado do canal, e C é um coeficiente, que pode ser calculado a partir da fórmula de Manning:

$$C = \frac{R_h^{1/6}}{n} \quad (10)$$

onde, n é o coeficiente de rugosidade do canal e depende do material utilizado para construção do mesmo, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficiente de Rugosidade do Canal

Natureza das Paredes	n
Cimento Liso	0,010
Argamassa de Cimento	0,011
Pedras e Tijolos Rejuntados	0,013
Tijolos Rugosos	0,015
Alvenaria Ordinária	0,017
Canais com Pedregulhos Finos	0,020
Canais com Pedras e Vegetação	0,030
Canais em Mau Estado de Conservação	0,035

Sendo assim, a declividade pode ser escrita:

$$S = \frac{V^2 \cdot n^2}{R_h^{4/3}} \cdot 10^3 \text{ (m/km)} \quad (11)$$

Perda em Conduto sob Pressão (h_{cp})

A perda de carga em conduto sob pressão consiste no somatório das perdas: na entrada do conduto (h_e), por atrito (h_{ap}), nas curvas (h_c), nas reduções cônicas (h_r), nas bifurcações (h_b).

- *Perdas na entrada do conduto (h_e):* definida a partir da velocidade média V_e (m/s), imediatamente à jusante da entrada e do coeficiente k_e , variável de acordo com a forma da boca do conduto (Figura 4).

$$h_e = k_e \cdot \frac{V_e^2}{2 \cdot g} \text{ (m)} \quad (12)$$

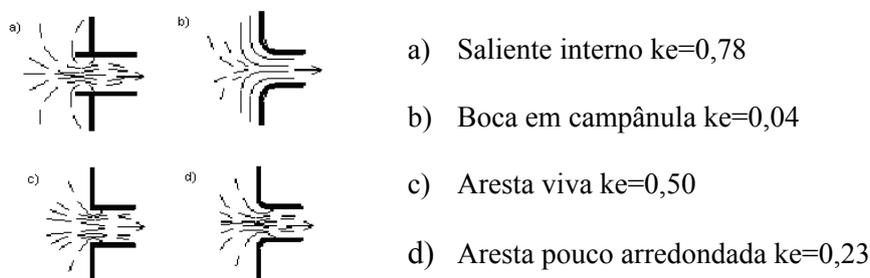


Figura 4 – Tipos de boca do conduto

- *Perdas por atrito (h_{ap}):* A perda de carga devido ao atrito pode ser calculada a partir da fórmula de Scobey, que fornece a perda de carga unitária J (m/km), onde, k_a é um

coeficiente que varia de acordo com o tipo de tubulação, (Tabela 3), e D_i (cm) é o diâmetro interno do conduto.

$$J = 410.k_a \cdot \frac{V_e^{1,9}}{D_i^{1,1}} \text{ (m/km)} \quad (13)$$

Tabela 3 - Valores de k_a

Conduto	k_a
Aço	0,32
Cimento-amianto	0,34
Concreto Armado	0,38

Desta forma, a perda de carga efetiva por atrito é dada pelo produto da perda de carga unitária pelo comprimento do conduto L_{cf} (km):

$$h_{ap} = J.L_{cf} \text{ (m)} \quad (14)$$

• *Perdas nas curvas (h_c):* estão relacionadas com o ângulo de deflexão da curva representado pelo coeficiente k_c , onde V é a velocidade média no conduto.

$$h_c = k_c \cdot \frac{V^2}{2.g} \text{ (m)} \quad (15)$$

O ângulo de deflexão da curva é o ângulo de mudança de direção entre as partes retas antes e depois da curva, sendo alguns valores válidos (Tabela 4) para quando a razão entre o raio da curva R (m) pelo diâmetro do conduto D (m) seja maior ou igual a dois: $R/D \geq 2$.

Tabela 4 - Valores de k_c

Ângulo de Deflexão	k_c
<10°	0
10° a 15°	0,03
15° a 30°	0,06
30° a 45°	0,09
>45°	0,13

• *Perdas nas reduções cônicas (h_r):* ocorre quando, em algum ponto do conduto, há diminuição em seu diâmetro, onde, V é a velocidade média no conduto à jusante da redução e k_r é o coeficiente de perda de carga nas reduções cônicas e varia de 0,005 a 0,010.

$$h_r = k_r \cdot \frac{V_r^2}{2.g} \text{ (m)} \quad (16)$$

• *Perdas nas bifurcações (h_b):* é computado quando se têm, ou pretende-se instalar, mais que uma unidade geradora, onde, V_b é a velocidade média no conduto à montante da bifurcação, o coeficiente de perda de carga nas bifurcações (k_b) depende da relação entre a área da seção de escoamento do conduto de entrada (A_e) e a área de escoamento dos braços da

saída (A_s) bem como da deflexão de cada um dos braços em relação ao alinhamento do tronco principal.

$$h_b = k_b \cdot \frac{V_b^2}{2 \cdot g} \quad (\text{m}) \quad (17)$$

A Tabela 5 apresenta os valores recomendados de k_b para uma deflexão de 30° ou ângulo de 60° entre os braços e relação $1 < A_e / A_s < 2$.

Tabela 5 - Valores de k_b

Número de unidades para o escoamento	k_b
1 Unidade Geradora	1,20
2 Unidades Geradoras	0,25

Com base no equacionamento apresentado, tem-se um estudo completo para a determinação da potência específica de uma PCH, sendo que as Equações 18, 19 e 20 apresentam este estudo de forma resumida, dando ênfase às perdas de cargas, porém sem entrar no mérito do equacionamento detalhado de cada uma, conforme destacado.

$$P_e = \gamma \cdot \eta \cdot Q \cdot (H_b - \sum \text{Perdas}) \quad (\text{kW}) \quad (18)$$

$$P_e = \gamma \cdot \eta \cdot Q \cdot [H_b - (h_{ca} + h_g + h_a + h_{cp})] \quad (\text{kW}) \quad (19)$$

$$P_e = \gamma \cdot \eta \cdot Q \cdot [H_b - (h_{ca} + h_g + h_a + h_e + h_{ap} + h_c + h_r + h_b)] \quad (\text{kW}) \quad (20)$$

4. SISTEMAS SUPERVISÓRIOS E DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Os sistemas SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition system*) são sistemas que visam a monitoramento e controle de processos, desenvolvidos para funcionar como interface homem-máquina, conforme apresenta GAIDZINSKI (2003).

As etapas do desenvolvimento de um sistema de supervisão envolvem a especificação, criação do ambiente gráfico e das telas na plataforma escolhida, criação dos bancos de dados, configurações e testes finais. A especificação é a parte primordial desse desenvolvimento, etapa esta que inclui a escolha do *software* que será utilizado, a determinação dos pontos de controle, entradas e saídas do processo e necessidade de comunicação com outros equipamentos, segundo GAIDZINSKI (2003), GRANDI (2000).

Existe uma variedade de empresas fornecedoras de *software* voltado ao desenvolvimento de aplicativos SCADA. Estudos sobre requisitos de hardware, preço, detalhamento da aplicação, se há ou não necessidade de aperfeiçoamento constante do aplicativo ou de pessoal são determinantes para a boa escolha da plataforma. Com auxílio do estudo realizado por GAIDZINSKI (2003) sobre os programas computacionais disponíveis no mercado e contatos da universidade com empresas da região, adotou-se o Elipse E3® como plataforma de desenvolvimento para a criação do sistema supervisório didático de monitoramento.

4.1. Elipse E3®

A plataforma Elipse E3®, ELIPSE (2007), oferece um novo e avançado modelo de objetos, uma poderosa interface gráfica e facilidades de conexão com dispositivos e aplicativos. Novos recursos e ferramentas de edição facilitam o desenvolvimento de

aplicações e diminuem o tempo de configuração de aplicativos. Sua estrutura de projeto modular com processamento distribuído em rede integra recursos de vídeo e suporte à diversas tecnologias como COM/DCOM, ActiveX e OPC. É possível realizar a comunicação com um grande número de dispositivos de controle e aquisição de dados, sendo que informações podem ser apresentadas através de interfaces gráficas, em um computador *stand-alone*, em computadores em rede ou pela Internet/Intranet. Ainda, possui registro e análise de dados através de históricos, controle dos alarmes, conexão com bancos de dados e linguagem de *scripts*.

Contudo, em modo de demonstração (*demo*) o ambiente de desenvolvimento (E3 Studio) restringe o uso dos símbolos das bibliotecas, sendo acessível apenas o primeiro objeto de cada biblioteca que acompanha o *software*. Podem ser usadas 20 *tags* externas para comunicação, mas não há limites para as *tags* internas. O servidor que executa o domínio da aplicação (E3 Server) pode permanecer até 2 horas em operação, devendo ser reiniciado após esse tempo.

4.2. Fatores determinantes para a escolha do Elipse E3®

O aplicativo a ser desenvolvido, por se tratar de um meio acadêmico, não necessita de comunicações externas, pois a simulação da mudança dos valores das variáveis é obtida através de banco de dados, e o tempo de execução sem interrupção não precisa ser muito longo, pois a duração das aulas é relativamente curta. O Elipse E3® é um produto recente de alto nível tecnológico e apresenta facilidades como importação de figuras e utilização de recursos de bibliotecas. Ainda, o número de variáveis internas é ilimitado, fixando o E3 como a opção de ferramenta para o desenvolvimento.

5. SISTEMA SUPERVISÓRIO PARA MONITORAMENTO DE PCH

O sistema supervisório desenvolvido, denominado Sistema Supervisório para Monitoramento de PCH (SiSMo-PCH), é capaz de simular a geração de energia de acordo com a modelagem matemática apresentada na seção 3 deste artigo. Até o momento, as variáveis modeladas são: o nível do reservatório e a potência gerada de acordo com as perdas a serem consideradas. Contudo, o sistema está preparado para inserção de novas variáveis de monitoramento, em estudo, como: velocidade de água, rotações da turbina e vazão no duto.

Uma variável (*tag*) interna do sistema supervisório é responsável pela variação do nível do reservatório para que sejam realizados os estudos como, por exemplo, a influência desse nível com a potência máxima que a PCH pode gerar. Outras duas *tags* internas são utilizadas para simulação do fator de potência que assume valores randômicos durante o tempo de simulação e outra para sinalização da data e hora para o usuário, essa última importante para que os registros dos valores simulados possam ser posteriormente verificados nos relatórios emitidos pelo sistema. Uma visão geral do sistema é fornecida no fluxograma da Figura 5.

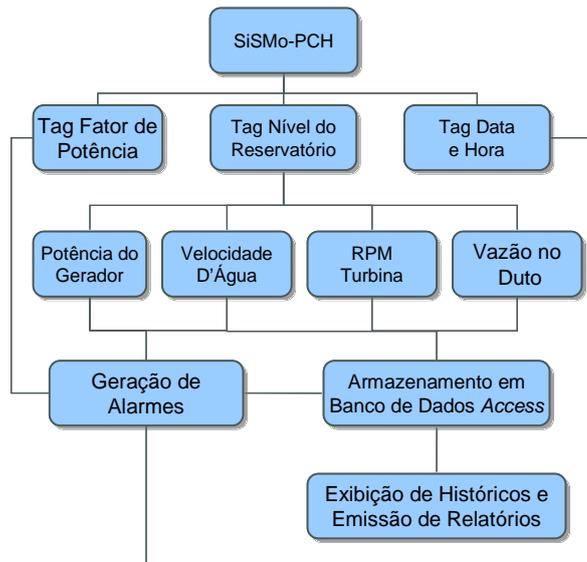


Figura 5 - Diagrama esquemático do sistema supervisório.

Com o propósito de utilizar o sistema supervisório no meio acadêmico, como *software* de apoio em aulas de laboratório para estudo das PCHs, foram criadas interfaces gráficas amigáveis que fossem explicativas, de fácil utilização tanto para professores quanto para alunos.

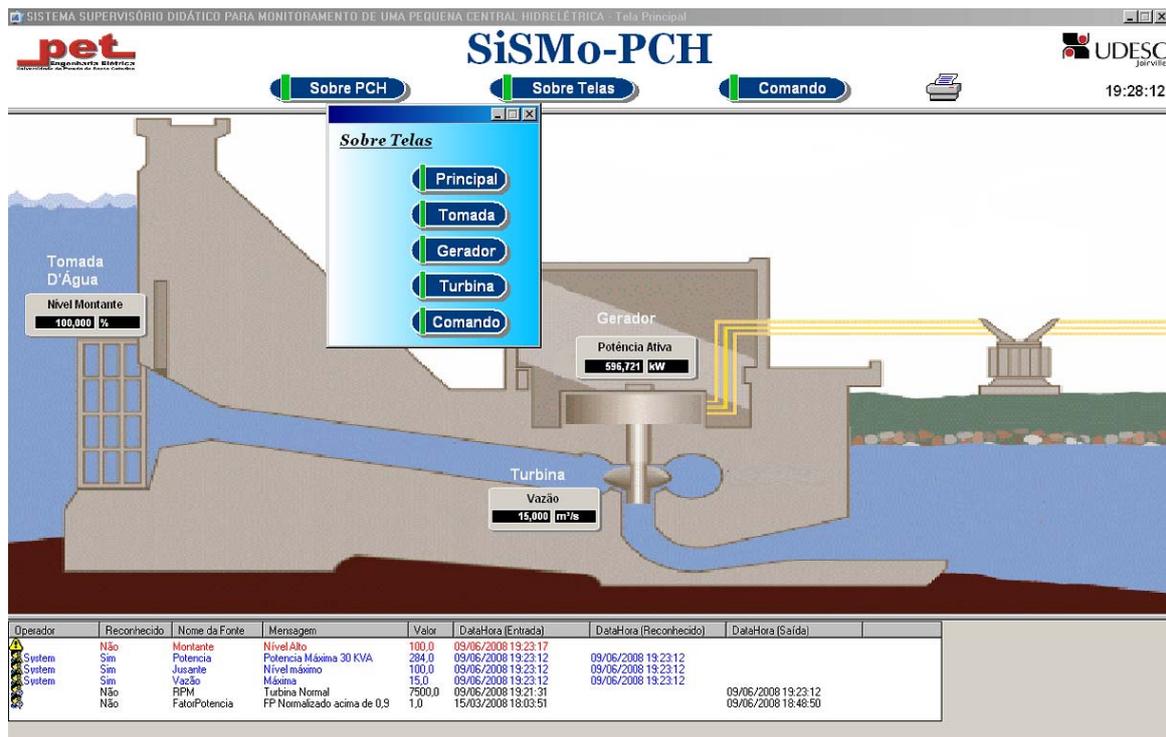


Figura 6 - Tela principal do supervisório SiSMo-PCH.

Além disso, foi objetivo um aplicativo com telas que tivessem características e elementos utilizados nas aplicações práticas. Essas características podem ser observadas na tela principal do sistema (Figura 6) onde se encontram o acesso aos subsistemas da PCH, tomada d'água, gerador e turbina, menu para telas de explicação e de comando e tabela com alarmes gerados durante as simulações.

O SiSMo-PCH contém telas que apresentam conteúdo teórico sobre PCHs e explicativo sobre o funcionamento do *software*, acessados a partir do menu superior da tela principal. Ao clicar sobre o botão “Sobre PCH”, por exemplo, é mostrado ao aluno uma pequena contextualização e informações teóricas sobre pequenas centrais hidrelétricas (Figura 7).

Complementações teóricas são oferecidas através de um Manual do Usuário, disponibilizado junto ao SiSMo- PCH.

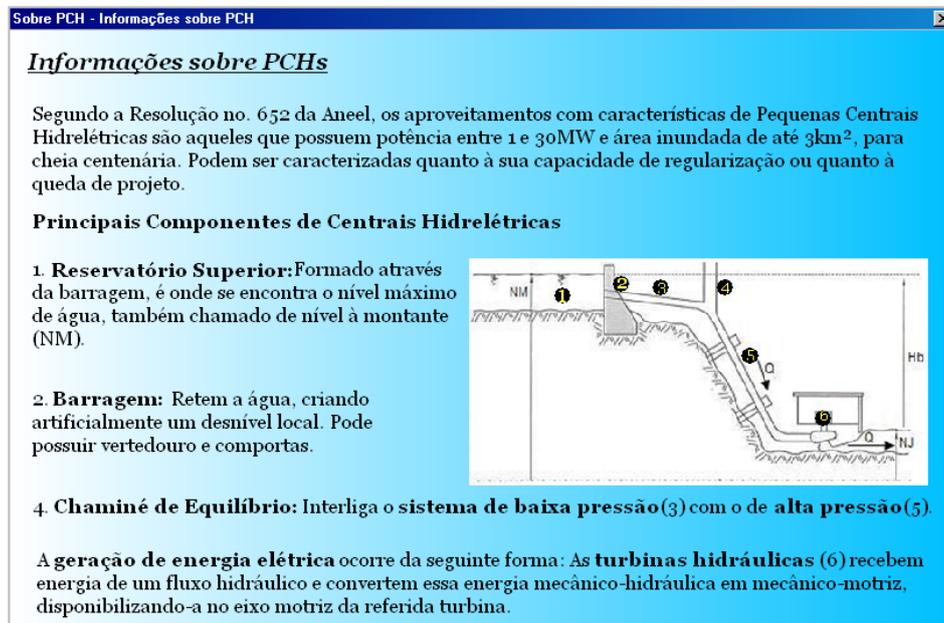


Figura 7 - Tela com fundamentação teórica sobre PCHs.

5.1. Realizando simulações com o SiSMo-PCH

As diferentes simulações permitidas pelo aplicativo podem ser configuradas na Tela de Comando (Figura 8), que também é acessada através do menu superior da tela principal. Os campos desta tela possuem valores padrões já definidos.

Antes de realizar a simulação é necessário entrar com os dados da PCH e, caso queira simular perdas, os dados dos parâmetros necessários para se obter cada tipo de perda.

O usuário (professor ou aluno) pode escolher entre dois modos de simulação: no modo *Simulação* a variável do nível do reservatório assume valores randômicos entre 0 e 100% do valor dado pela altura bruta do aproveitamento, e no modo *Passo a Passo*, o nível do reservatório aumenta em passos e em intervalos de tempo definidos pelo usuário. Este segundo modo é utilizado quando se deseja determinar a potência com nível a 100%, pois ao chegar na altura máxima a simulação pára neste valor. A escolha do modo e início (ou pausa) da simulação são realizadas através de chaves que mudam de posição com um clique simples.

A idéia da tela de comando é proporcionar ao professor uma maior gama de possibilidades para simulações. É possível alterar parâmetros e assim realizar estudos sobre o rendimento do conjunto turbina-gerador, variação da vazão, altura do aproveitamento e consideração ou não das perdas já mencionadas em seção anterior.

Como ocorre normalmente em sistemas de supervisores de plantas reais com os valores monitorados, o SiSMo-PCH armazena os dados simulados em um banco de dados. O banco de dados é constituído por duas tabelas que constituem o Histórico das simulações: Tabela de Alarmes e Tabela Geral. Na Tabela de Alarmes são apresentados os registros de alarmes que ocorrem durante as simulações, indicando a data e hora de entrada desse alarme e se ele foi ou não reconhecido pelo usuário. Esse reconhecimento é feito dando um clique duplo sobre o

alarme, quando este surge na tabela presente na tela principal. Já na Tabela Geral são armazenados os valores de variáveis selecionadas dos três subsistemas, sendo elas: nível do reservatório, potência, vazão e RPM da turbina. Através da consulta dessa tabela também são mostrados as variáveis de interesse de cada subsistema.

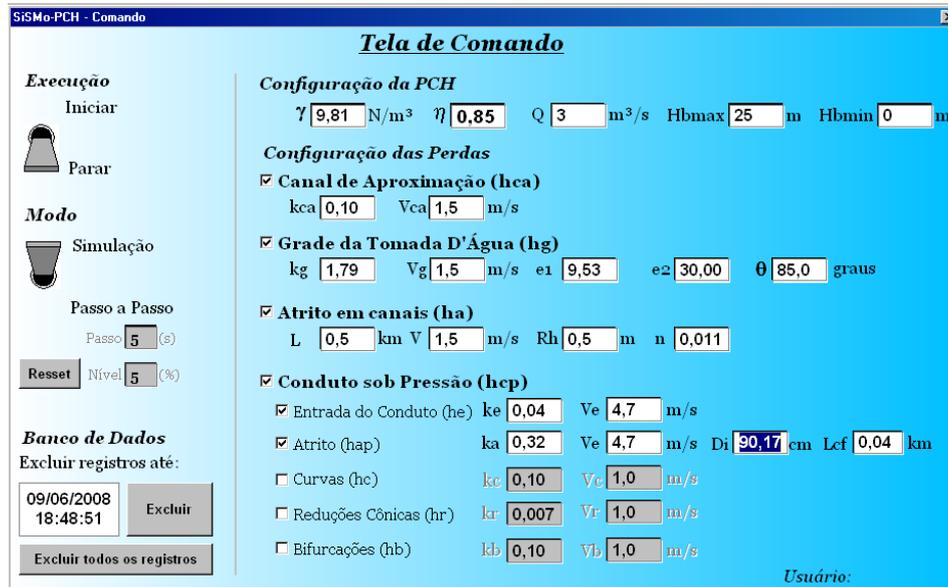


Figura 8 - Tela de comando do SiSMo-PCH.

A Figura 9 apresenta a tela do subsistema da Tomada D'Água, onde pode ser visualizado uma consulta ao banco de dados dos últimos dez registros das variáveis montante e jusante.

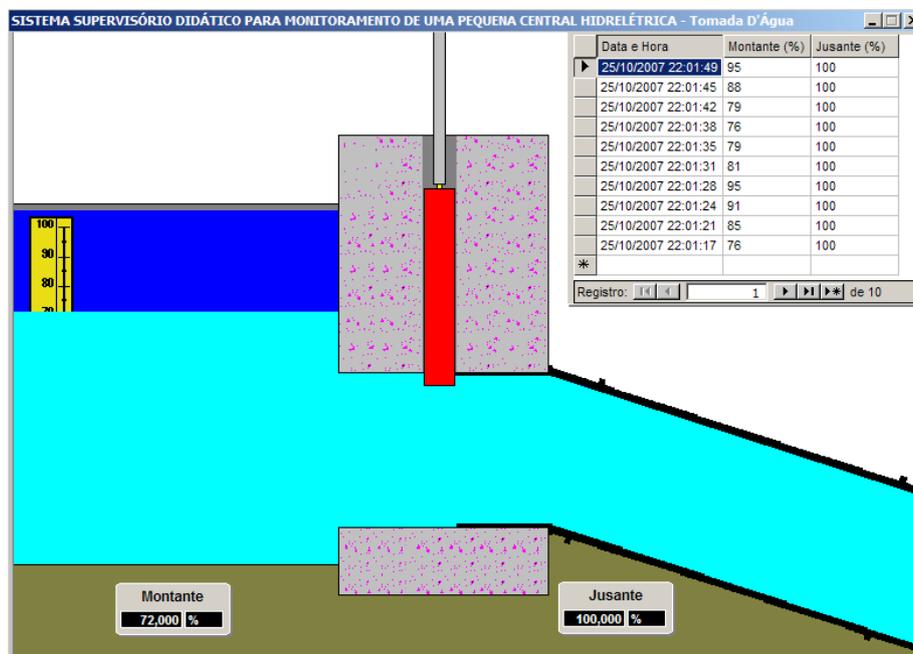


Figura 9 - Tela tomada d'água: visualização das variáveis de interesse.

A maior vantagem do armazenamento dos resultados das simulações no banco de dados é a possibilidade de se emitir relatórios das simulações diretamente através do sistema supervisorio. Isso possibilita ao professor solicitar diferentes simulações durante a aula de

laboratório, pois os resultados poderão ser visualizados pelos alunos após as experiências. Um trecho do relatório dos dados é mostrado na Figura 10.

SiSMo-PCH
Relatório de Dados

Data / Hora	Montante (%)	Potência (kW)	Vazão (m³/s)	RPM
6/6/2008 12:19:04	21	751,1	6,3	3150
6/6/2008 12:19:07	29	757,3	8,7	4350
6/6/2008 12:19:11	20	750,3	6,0	3000
6/6/2008 12:20:05	25	754,1	7,5	3750
6/6/2008 12:20:10	50	772,5	15,0	7500

Figura 10 - Trecho do relatório de dados emitido pelo SiSMo-PCH

5.2. Exemplo comparativo

Como forma de validação do sistema supervisorio desenvolvido, foi simulado um exemplo apresentado por ELETROBRÁS (1999), cujo objetivo é determinar a potência a ser instalada em um aproveitamento hidrelétrico de acordo com os dados da Tabela 6.

Tabela 6 - Dados do exemplo simulado

Configuração da PCH					
		γ	9,81 N/m ³		
		η	0,85		
		Q	3 m ³ /s		
		H _{bmax}	25 m		
		H _{bmin}	0 m		
Configuração de Perdas					
Canal de aproximação	k _{ca}	0,10	Atrito em canais	L	500 m
	V _{ca}	1,5 m/s		V	1,5 m/s
Grade da tomada d'água	k _g	1,79		R _h	0,5 m
	V _g	1,5 m/s		n	0,011
	e ₁	9,53.10 ⁻³ m		k _a	0,32
	e ₂	3,0.10 ⁻² m		V _e	4,7 m/s
Entrada do conduto sob pressão	θ	85°	Atrito no Conduto sob pressão	D _i	0,902 m
	k _e	0,04		L _{cf}	4,0.10 ³ m
	V _e	4,7 m/s			

A unidade turbogeradora, neste caso, é alimentada por um sistema adutor constituído de um canal entre a barragem e a câmara de carga e de uma tubulação forçada em aço, alimentando uma única unidade geradora, entre a câmara de carga e a casa de máquinas. O canal, em concreto, possui acabamento de argamassa de cimento na proporção 1:3 e curvas suaves.

Para esta simulação foi desconsiderada a grade da tomada d'água da tubulação forçada. Os coeficientes k_g, k_a e k_e foram retirados da Tabela 1, Tabela 3 e Figura 4 deste artigo, respectivamente. Os valores da potência líquida a ser instalada neste aproveitamento obtida através do exemplo citado e através do *software* desenvolvido são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Comparativo da potência líquida

Exemplo Eletrobrás	597,17 kW
SiSMo-PCH	596,72 kW

Analisando os valores de potência líquida fornecido pelo exemplo base da ELETROBRÁS (1999) e obtido pela simulação através do *software* desenvolvido SiSMo-PCH, observa-se um erro de 0,075%, o que valida o sistema desenvolvido até o presente momento, deixando grandes expectativas para as etapas de ampliação do supervisório com a inserção de novas variáveis a serem monitoradas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema supervisório apresentado desenvolvido para a monitoração de uma PCH, SiSMo-PCH, mostrou ser uma ferramenta bastante prática para avaliação e compreensão do funcionamento de uma PCH, principalmente por possuir uma interface gráfica que permite acompanhar a evolução de algumas das variáveis envolvidas na geração de energia elétrica.

Este aplicativo foi desenvolvido em Elipse E3® por apresentar, em sua versão demonstrativa, um número ilimitado de variáveis internas e por se tratar de um produto atual, com alto nível tecnológico e diversas facilidades de programação.

As variáveis selecionadas serviram de ponto de partida para a modelagem matemática completa a ser obtida para uma PCH, de forma a tornar mais real este sistema de monitoramento. Além disso, a existência de um banco de dados capaz de armazenar os resultados das simulações e posterior consulta através da emissão de relatórios, são ferramentas muito visadas e essenciais na aplicação prática de um sistema supervisório.

O aplicativo permite o emprego, como trabalho futuro, de estudos voltados à área de máquinas elétricas, focados em geradores síncronos, fator de potência e compensação de reativos da rede. Por outro lado, um estudo sobre o comportamento da vazão da água, de acordo com a variação do nível do reservatório, também é válido.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Educação Tutorial – PET, mantido pelo MEC/SESu/DEPEM, pelo auxílio financeiro dos bolsistas, bem como à Elipse *software* pelo treinamento cedido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL, Resolução No. 652, de 9 de dezembro de 2003.

ANEEL, Banco de Informações de Geração, 2008. www.aneel.gov.br.

BERGMAN, W.J. **Equipment monitoring selection as a part of substation automation, circuit breaker monitoring.** IEEE Switchgear Meeting, Pittsburgh, 1999.

ELETROBRÁS, Diretrizes para Projetos de PCHs, 1999. www.eletrabras.com.

ELIPSE Software. Produtos, 2007. www.elipse.com.br

GAIDZINSKI, V.H. **A Tecnologia da Informação no Chão de Fábrica: As Novas Ferramentas e a Gestão Integrada da Informação**. 2003. Dissertação (Mestrado) - UFSC, Florianópolis.

GRANDI, G. **Metodologia para Especificação de Telecontrole em Subestações de Energia Elétrica**. 2000. Tese (Doutorado), UFSC, Florianópolis.

PELICIOLO, J.A. e FERGÜTZ, M. **Controle de Cargas para PCH's**. 2005. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação em Automação Industrial). Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville.

SCHREIBER, G.P. **Usinas Hidrelétricas**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1978.

SIMONE, G.A. **Centrais e Aproveitamentos Hidrelétricos – Uma Introdução ao Estudo**. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2000.

SOUZA, Z. **Centrais Hidrelétricas – Dimensionamento de Componentes**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1992.

DIDATIC SUPERVISORY SYSTEM FOR MONITORING A SMALL HYDROPOWER PLANT

Abstract: *This paper introduces the basics of hydroelectric power generation through small hydropower plants, identifying the main variables involved in the process. These variables are adapted to a SCADA system based on the software Eclipse E3®. The aim of the project is to use computational programs based on the SCADA philosophy to teach hydroelectric power generation to undergraduate students pursuing a degree course in electrical engineering.*

Key-words: *Monitoring, hydroelectric power generation, SCADA systems, simulation software.*