

## Procedimentos para Consolidação de Dados de Usinas Hidrelétricas Baseados nas Informações Registradas

Ieda G. Hidalgo, Secundino Soares F., Darrell G. Fontane, Marcelo A. Cicogna, João Eduardo G. Lopes

Colorado State University - Department of Civil and Environmental Engineering - EUA

iedahidalgo@gmail.com; dino@cose.fee.unicamp.br; fontane@engr.colostate.edu; marcelo.cicogna@gmail.com; jelopes1@gmail.com

Recebido: 02/02/09 - revisado: 06/05/10 - aceito: 27/10/11

---

### RESUMO

*Este artigo apresenta uma sequência de procedimentos para consolidação de dados de usinas hidrelétricas. Os procedimentos são baseados nos dados de cadastro e de pós-operação registrados pela companhia que administra a operação da usina. A metodologia proposta faz uso de um gerenciador de dados, um construtor de consultas, um gerador da função de rendimento global e uma planilha eletrônica. Ela foi aplicada aos dados de uma grande usina hidrelétrica brasileira que faz parte do Sistema Interligado Nacional (SIN) e cuja operação está sob coordenação do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Os benefícios da consolidação de dados são analisados usando um simulador da operação de usinas hidrelétricas. Este simulador é utilizado na tentativa de reproduzir a operação passada da usina, inicialmente com dados oficiais e, posteriormente, com dados consolidados. Os resultados mostram significantes melhorias em termos da qualidade dos dados, contribuindo para a eficiência e confiabilidade dos modelos computacionais em uso no Setor Elétrico Brasileiro (SEB) para o planejamento da operação.*

**Palavras-Chave:** Qualidade de Dados, Rendimento Global, Usinas Hidrelétricas.

---

### INTRODUÇÃO

O objetivo do planejamento da operação de sistemas de energia elétrica é assegurar uma política de operação econômica e confiável para o sistema. No caso brasileiro, esse planejamento caracteriza-se como um problema de otimização dinâmico, de grande porte, interconectado, estocástico e não linear; apresentando um grande desafio para engenheiros eletricitistas, hidrólogos e modeladores.

Em geral, o planejamento energético é feito com o auxílio de ferramentas computacionais para otimização, simulação e previsão de vazões. Essas ferramentas manipulam dados em modelos matemáticos. Por esta razão, a qualidade dos dados tem grande influência sobre o resultado do planejamento. De forma geral, o que explica o comportamento inesperado dos modelos é a baixa qualidade dos dados fornecidos a eles.

A necessidade de acompanhamento e consolidação de dados não se restringe a grandes e complexos sistemas de geração elétrica, como o brasileiro. Isto porque toda medida está sujeita a erros que podem ser de precisão ou até mesmo grosseiros. Os erros de precisão, chamados sistemáticos, dependem do instrumento ou do método de

medição utilizado. Os erros grosseiros, conhecidos como acidentais, podem ser causados por leitura incorreta ou engano nos cálculos (Lind et al., 2006).

Oliveira e Canellas (1999) destacam a importância de dados hidrometeorológicos confiáveis no gerenciamento de recursos hídricos. Esse trabalho apresenta a experiência de Furnas na instalação de postos hidrometeorológicos convencionais e telemétricos, serviços de hidrometria, monitoramento e previsão de vazões a tempo real.

Rodrigues (2002), em sua dissertação de mestrado, propõe um sistema de controle de qualidade on-line de dados hidrológicos teletransmitidos para validar e consolidar os dados das estações telemétricas da ANA instaladas na bacia do rio Tocantins. Ele destaca que a pré-análise dos dados é fundamental para que se alcance o objetivo de uma base de dados sólida e confiável.

Lopes (2001), em sua dissertação de mestrado, sugere, como um dos itens da lista de trabalhos futuros, a melhoria da qualidade dos dados das usinas hidrelétricas e das séries hidrológicas.

Lopes (2003) comenta que problemas na qualidade dos dados utilizados pelo SEB podem super-estimar a energia disponível no SIN. Nesse mesmo trabalho, ele conclui: "Tanto quanto discutir alternativas de modelagem é importante consolidar

os dados utilizados para melhorar a representatividade das usinas. Analisar metodologia separadamente do detalhamento e qualidade dos dados é uma grande falha, pois os técnicos que desenvolvem a metodologia é que conhecem os requisitos dos dados”.

Segundo Lopes (2007), “A falta de uma base de dados única e consistida para o setor elétrico nacional é permanente fonte de problemas”. Nesse trabalho, Lopes faz uma análise crítica da qualidade dos dados de um dos arquivos de entrada dos modelos NEWAVE e DECOMP. Além disso, ele relaciona os dados que influenciam significativamente nos resultados dos modelos utilizados no planejamento da operação energética.

Diniz et al. (2007) estuda dois modelos matemáticos para a representação do rendimento de unidades geradoras de usinas hidrelétricas. Para encontrar os coeficientes dos modelos, ele usa uma técnica de regressão linear sobre os pontos de uma curva colina.

Colnago (2007) ajusta curvas de rendimento de turbinas com o auxílio de métodos de medição de vazão. Segundo ele, um despacho ótimo que usa curvas de rendimento derivadas de modelo reduzido provavelmente não otimiza a geração da usina.

Resende (2007) avalia as características de condutos forçados infestados por *limnoperna fortunei* (mexilhão dourado). Ele afirma que usar tabelas convencionais para adoção de coeficientes para perdas hidráulicas pode conduzir a enganos.

Hidalgo et al. (2009a) descreve o gerenciador de dados HydroData e o construtor de consultas HydroConsulta com foco na análise crítica dos dados envolvidos no planejamento e na programação da operação energética. Esse artigo também apresenta uma correção no polinômio do canal de fuga de uma usina hidrelétrica brasileira do SIN usando simultaneamente o HydroData, o HydroConsulta e a ferramenta Linha de Tendência do Excel.

Hidalgo et al. (2009b) analisa seis funções que influenciam no planejamento da operação hidrelétrica. Para isso são usados o HydroData, o HydroConsulta e o simulador da operação de usinas hidrelétricas HydroSim CP. Esse artigo mostra que, embora cada um desses módulos tenha um objetivo específico, todos eles podem ser usados como ferramenta para avaliação de consistência de dados.

Hidalgo et al. (2009c) explora duas aplicações do HydroSim CP, como ferramenta para análise de dados de usinas hidrelétricas. A primeira aplicação tem como objetivo a reprodução da trajetória de vazão turbinada registrada pela usina. A segunda tem como meta a reprodução da trajetória de gera-

ção verificada. As vantagens e desvantagens de cada aplicação são discutidas nesse artigo.

Hidalgo et al. (2009d) analisa o impacto da qualidade dos dados de usinas hidrelétricas na reprodução da operação. Essa análise é feita usando o HydroSim LP. Ainda nesse artigo, compara-se o uso do rendimento global médio e variável em dados de operação de médio prazo.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma sequência de procedimentos que visam à melhoria da qualidade dos dados das usinas hidrelétricas. Os procedimentos são baseados nos dados cadastrais e de pós-operação registrados pela companhia que administra a operação da usina. Dados cadastrais são dados estáticos, levantados na fase de projeto e construção da usina, que dão suporte ao registro da operação. Dados de pós-operação são dados dinâmicos que variam com o intervalo de operação e podem ser medidos ou calculados.

Este artigo está organizado como segue: a primeira seção apresenta a função de produção hidrelétrica e a equação de balanço hídrico, a segunda descreve as ferramentas utilizadas neste trabalho, a terceira mostra o critério de seleção dos dados para o processo de consolidação, a quarta detalha os procedimentos para consolidação dos dados e a quinta apresenta o impacto da consolidação dos dados para os modelos de planejamento da operação em uso no setor elétrico brasileiro.

## COMPONENTES DO PROBLEMA

Considerando a formulação mais usual para o problema brasileiro de planejamento da operação hidrelétrica são apresentadas: a função de produção hidrelétrica e a equação de balanço hídrico (Barros et al., 2003; Vinhal, 1998; Pereira e Pinto 1985).

### Função de Produção Hidrelétrica

O objetivo da função de produção, Equação (1), é quantificar a geração de energia de uma usina hidrelétrica.

$$p = k \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot [\phi(x) - \theta(u) - h_p] \cdot q \quad (1)$$

onde:

$p$  É a potência instantânea obtida no processo de conversão da energia potencial em energia elétrica (MW).

$k$  É uma constante composta pela aceleração da

gravidade, multiplicada pelo peso específico da água e dividida por  $10^6$ . Seu valor é 0,00981 (MW/(m<sup>3</sup>/s)/m).

$\eta_t, \eta_g$  É o rendimento do conjunto turbina-gerador no processo de conversão da energia mecânica em energia elétrica.

$x$  É o volume armazenado no reservatório da usina (hm<sup>3</sup>).

$\emptyset(x)$  É o nível d'água do reservatório, o qual é função do volume  $x$  (m).

$u$  É a vazão defluente da usina, isto é, a soma das vazões turbinada e vertida (m<sup>3</sup>/s).

$\theta(u)$  É o nível d'água do canal de fuga, o qual é função da vazão defluente  $u$  (m).

$h_p$  É a perda de carga hidráulica que a água sofre pelo percurso de adução desde o reservatório até as turbinas. Geralmente esta perda é descrita como uma função da vazão turbinada (m).

$q$  É a vazão turbinada na casa de máquinas (m<sup>3</sup>/s).

### Equação de Balanço Hídrico

O objetivo da equação de balanço hídrico, Equação (2), é quantificar o balanço de conservação de massa de água do reservatório da usina.

$$x = x_0 + \left( y + \sum_{k \in \Omega} u_k - (q + v + ev + uc) \right) \frac{\Delta t}{10^6} \quad (2)$$

onde:

$x_0$  É o volume armazenado no reservatório no início do intervalo  $t$  (hm<sup>3</sup>).

$y$  É a vazão incremental afluyente à usina durante o intervalo  $t$  (m<sup>3</sup>/s).

$\Omega$  É o conjunto de usinas imediatamente à montante da usina considerada.

$v$  É a vazão vertida durante o intervalo  $t$  (m<sup>3</sup>/s).

$ev$  É a evaporação do reservatório durante o intervalo  $t$ . Ela é função da área do reservatório (m<sup>3</sup>/s).

$uc$  É o uso consuntivo do reservatório durante o intervalo  $t$  (m<sup>3</sup>/s).

$\Delta t$  É a duração do intervalo  $t$  (s).

Para auxiliar o cálculo dos parâmetros envolvidos nas equações apresentadas anteriormente, utilizam-se as oito funções estáticas descritas na sequência (Encina et al., 2002).

1. **Polinômio Área  $x$  Cota:** A área do reservatório é função da cota do nível d'água de montante. Costuma-se utilizar polinômios

de até quarto grau para representar essa função. A obtenção desses polinômios é feita a partir de estudos topográficos da região alagada pela construção da barragem.

2. **Polinômio Cota  $x$  Volume:** A cota do nível d'água de montante é função do volume armazenado no reservatório. O polinômio cota  $x$  volume pode ser obtido de uma transformação numérica do polinômio área  $x$  cota usando o método geométrico de "Tronco de Prisma" (linear ou integral).
3. **Polinômio Cota  $x$  Defluência:** A cota do nível d'água de jusante é função da vazão defluente. Em geral, esta função também é representada por polinômios. Para algumas usinas hidrelétricas, a elevação do canal de fuga também depende do remanso na confluência de rios ou do reservatório da usina imediatamente a jusante. Neste caso, a usina pode ter mais de um polinômio para representar o canal de fuga.
4. **Função de Potência Máxima:** A potência máxima de uma unidade geradora é definida como o maior valor de potência ativa que pode ser produzida para uma determinada altura de queda, levando-se em conta as limitações da turbina e do gerador.
5. **Função de Engolimento Máximo:** O engolimento máximo de uma unidade geradora é definido como a vazão turbinada que, numa dada altura de queda, produz a potência máxima da unidade.
6. **Função de Rendimento da Turbina:** O processo de transformação da energia mecânica em energia elétrica está sujeito ao rendimento das máquinas envolvidas na operação. O rendimento da turbina pode ser expresso como uma função da queda bruta ou líquida pela potência ou vazão turbinada. Em geral, essa função é fornecida pelo fabricante da turbina de acordo com ensaios de laboratório em modelos reduzidos. Devido a sua forma, a função de rendimento da turbina também é chamada de "Curva Colina".
7. **Função de Rendimento do Gerador:** No gerador ocorrem perdas por atrito mecânico e produção de calor. O rendimento do gerador é função da potência gerada. Entretanto, o sistema brasileiro não utiliza esta informação e, usualmente adota um valor constante.
8. **Função de Perda Hidráulica:** A perda de carga hidráulica que a água sofre pelo per-

curso de adução desde o reservatório até as turbinas ocorre, principalmente, pelo atrito entre a água e as paredes do canal de adução. Esta perda pode ser estimada proporcional ao quadrado da vazão turbinada, porém, a maioria das usinas hidrelétricas brasileiras representa essa perda com um valor constante ou como uma porcentagem da queda bruta.

## FERRAMENTAS UTILIZADAS

Além dos cálculos que podem ser feitos numa planilha eletrônica (Bloch, 2003), a metodologia proposta para consolidação de dados e a análise final dos resultados fazem uso de outras quatro ferramentas: um gerenciador de dados, um construtor de consultas, um gerador da função de rendimento global e um simulador da operação de usinas hidrelétricas. O projeto de software e a implementação computacional da maioria desses módulos usam o paradigma da orientação a objeto (Cicogna, 1999; Horstmann, 1997), a linguagem de programação C++ (Hollingworth et al., 2001; Josuttis, 1999), e a linguagem estruturada SQL (Elmasri e Navathe, 2000; Bowman et al., 1996). Porém, a utilização dos mesmos não exige qualquer conhecimento específico do usuário.

### Gerenciador de Dados

O gerenciador de dados é usado para a organização, padronização e gerenciamento dos dados de usinas hidrelétricas. Sua organização interna e seus recursos gráficos permitem uma análise crítica sobre a qualidade da informação nele contida. É possível, por exemplo, visualizar graficamente os polinômios que relacionam: a área do reservatório  $x$  o nível de montante, o nível de montante  $x$  o volume do reservatório e o nível de jusante  $x$  a vazão defluente. Também, as funções relacionadas com os limites operativos da usina, como potência máxima e engolimento máximo em função da altura de queda, podem ser graficamente analisadas. Para as curvas colinas de rendimento das turbinas, além da visualização em três dimensões, pode-se fazer cortes horizontais ou verticais para criar planos bi-dimensionais a fim de analisar a qualidade da informação. Esse módulo possui ainda uma calculadora que permite ao usuário fornecer o armazenamento e a defluência de uma usina para obter sua potência, rendimento turbina-gerador, vertimento,

produtividade, cotas do reservatório e do canal de fuga, queda bruta e líquida e perda hidráulica. Por fim, esse aplicativo apresenta, sob a forma gráfica e de tabelas, os dados de pós-operação de uma usina (Cicogna, 2003).

Neste trabalho o gerenciador de dados será usado com dois objetivos. O primeiro é alimentar o simulador com informações cadastrais oficiais do setor elétrico. O segundo objetivo é apresentar gráficos com os dados de pós-operação, registrados na base, a fim de compará-los com os gráficos resultantes de simulações para o mesmo período de operação.

### Construtor de Consultas

O construtor de consultas permite construir, armazenar e gerenciar buscas avançadas sobre bases de dados de usinas hidrelétricas. Ele não requer conhecimento específico da linguagem SQL ou da estrutura da base de dados analisada. Suas consultas podem ser aplicadas para todas as usinas hidrelétricas de uma só vez, facilitando a supervisão dos dados de um sistema hidrelétrico inteiro. Esse módulo pode também ser usado como um gerador de relatórios e como um visualizador das informações contidas na base. Ele permite manipular os dados do resultado de uma consulta em operações matemáticas. Para isso, o aplicativo disponibiliza um recurso capaz de exportar dados para planilhas eletrônicas, como o Excel. Esse módulo possui outras duas facilidades. Uma delas é a possibilidade de exportar consultas da base de dados para um arquivo texto e a outra é a possibilidade de importar consultas de um arquivo texto para a base de dados do módulo. Isso significa que as consultas gerenciadas por este aplicativo podem ser facilmente transportadas de um computador para outro porque, em geral, arquivos textos são menores que arquivos de base de dados. Além disso, os arquivos textos criados por este módulo podem ser armazenados como backup ou facilmente trocados por usuários do sistema (Hidalgo, 2004).

Neste trabalho o construtor de consultas também será usado com dois objetivos. O primeiro é extrair informações de pós-operação, da base de dados de uma usina, necessárias para a consolidação. O segundo objetivo é exportar dados do resultado de uma consulta para o Excel, a fim de manipulá-los em operações matemáticas.

### Gerador da função de rendimento global

O gerador da função de rendimento global

recebe como entrada as funções de rendimento da turbina, do gerador e a constante de perda hidráulica de uma máquina. Usando um método iterativo de cálculo, ele apresenta três tabelas, as quais relacionam: vazões turbinadas, “rendimento global” e perdas hidráulicas em função da queda bruta e da potência média gerada.

Neste trabalho o gerador da função de rendimento global será usado com o objetivo de encontrar uma matriz de “rendimento global” para uma usina. Essa única matriz contém os rendimentos e as perdas envolvidas na operação. O uso do rendimento global simplifica a função de produção e elimina a recursividade do seu cálculo, sem comprometer o planejamento e o registro de operação da usina. Na Figura 1, apresenta-se a simplificação da função de produção usando o conceito de rendimento global.

$$p = k.(\eta_g \cdot \eta_t) \cdot [\phi(x) - \theta(u) - h_f] \cdot q$$

$$p = k.n^G \cdot [\phi(x) - \theta(u)] \cdot q$$

Figura 1 - Função de produção, Equação(1), usando o conceito de rendimento global.

#### Simulador da operação de usinas hidrelétricas

O simulador da operação de usinas hidrelétricas pode ser usado para planejar a operação futura ou reproduzir a operação passada de uma ou várias usinas. Ele possui dois grandes módulos. Um deles é capaz de representar em detalhes as restrições operacionais ativas em horizontes de médio e longo prazo. O outro é capaz de representar uma grande coleção de restrições relacionadas às condições operativas em horizontes de curto prazo. O processo de simulação baseia-se na função de produção hidrelétrica, Equação (1), e no cálculo do balanço de massa de água dos reservatórios, Equação (2). Ele foi criado para a representação computacional de várias regras operativas para sistemas hidrotérmicos (Cicogna, 2003). Dentre o conjunto de regras operativas, chamadas internamente de políticas operativas, este trabalho faz uso de uma, para curto prazo, que permite simular a operação de reservatórios a partir do volume inicial, das trajetórias de geração, vertimento e afluência. A escolha desta política operativa deve-se ao fato de que os níveis de montante e de jusante, a geração elétrica e a vazão vertida numa usina são variáveis medidas.

Quanto à vazão afluente, ela é calculada e depende, entre outros, do polinômio cota  $\times$  volume.

Então, neste trabalho, o simulador da operação de usinas hidrelétricas será usado na tentativa de reproduzir o passado da operação da usina analisada para avaliar os benefícios da consolidação dos dados para o planejamento futuro da operação energética. Destaca-se que este simulador encontra-se em uso por empresas do setor elétrico brasileiro.

#### CRITÉRIO DE SELEÇÃO DOS DADOS PARA O PROCESSO DE CONSOLIDAÇÃO

A fim de selecionar os dados que participarão do processo de consolidação, fez-se uma análise detalhada da função de produção, Equação (1), e da equação de balanço hídrico, Equação (2). Os dados envolvidos no planejamento da operação elétrica foram classificados em estáticos e dinâmicos.

São estáticos:

- Polinômio Área  $\times$  Cota.
- Polinômio Cota  $\times$  Volume.
- Polinômio Cota  $\times$  Defluência.
- Função de Potência Máxima.
- Função de Engolimento Máximo.
- Função de Rendimento da Turbina.
- Função de Rendimento do Gerador.
- Função de Perda Hidráulica.

São dinâmicos:

- Nível de Montante (medido).
- Nível de Jusante (medido).
- Queda Bruta (diferença entre os níveis de montante e de jusante, medida).
- Vazão Afluente (depende do balanço hídrico o qual faz uso dos polinômios área  $\times$  cota e cota  $\times$  volume).
- Vazão Turbinada (calculada com base numa tabela que relaciona potência, queda e vazão).
- Vazão Vertida (medida).
- Vazão Defluente (soma das vazões turbinada e vertida).
- Potência Gerada (medida).
- Rendimento Turbina-Gerador (depende das funções de rendimento).
- Perda Hidráulica (depende da função de perda hidráulica).

Existe uma relação de dependência entre dados estáticos e dinâmicos. Por exemplo, o cálculo que converte o nível d'água do reservatório em volume armazenado faz uso da função inversa do polinômio cota  $\times$  volume que é uma informação estática. Porém, os dados envolvidos na representação do armazenamento, a cota e o volume, são medições realizadas em campo e, portanto, dinâmicos. Da mesma forma, a função de engolimento máximo é estática, porém a altura de queda e a vazão turbina-das relacionadas com essa função são dinâmicas. Pode-se afirmar que todas as variáveis dinâmicas não medidas, dependem dos dados estáticos.

Diante disso, a metodologia apresentada neste trabalho sugere que todos os dados estáticos sejam consolidados e que as funções: rendimento da turbina, do gerador e perda hidráulica, concentrem-se numa única chamada Função de Rendimento Global.

## PROCEDIMENTOS PARA CONSOLIDAÇÃO DOS DADOS

Para cada função estática a ser consolidada será apresentada a técnica de consolidação, um exemplo aplicado e a consequência da diferença entre a informação oficial e consolidada para os modelos de planejamento da operação em uso no setor elétrico. A metodologia foi aplicada a uma usina hidrelétrica brasileira de grande porte. Os dados cadastrais oficiais da usina foram obtidos dos arquivos de entrada dos modelos NEWAVE e DECOMP disponíveis no sítio da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Esses dados encontram-se cadastrados no gerenciador de dados. Os dados de pós-operação da usina foram fornecidos pela empresa responsável pela operação. Eles foram extraídos da base de dados e exportados para o Excel usando o construtor de consultas. A função de rendimento global foi calculada com o gerador da função de rendimento global. O Excel foi utilizado para os cálculos, ajustes polinomiais (Linha de Tendência) e otimização (Solver) (Baltar e Fontane, 2008; Lopes, 2001). Os coeficientes dos polinômios possuem sete algarismos significativos seguindo o padrão do setor elétrico na formatação dos dados.

### Polinômio Área $\times$ Cota

Para a consolidação do polinômio área  $\times$  cota é necessário reportar-se aos dados levantados no estudo mais recente da topografia da área alagada.

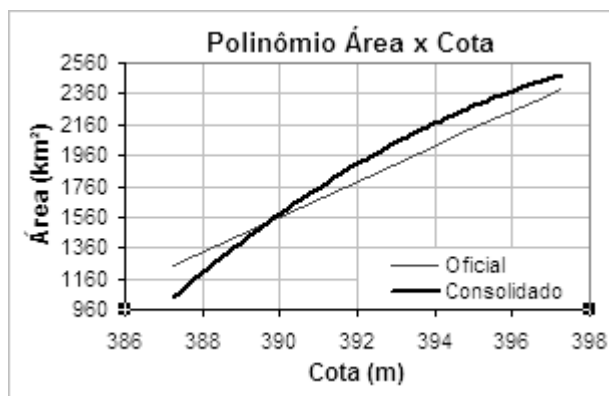
Os dados desse estudo devem apresentar os valores de cota mínima, máxima, maximorum e coroamento do reservatório. Para esses valores de cota não pertencentes ao levantamento aerofotogramétrico, a área deve ser interpolada ou extrapolada linearmente, salvo quando interpolações não lineares igualmente espaçadas constam no projeto original.

Na Tabela 1, apresentam-se os pontos “área  $\times$  cota  $\times$  volume” da usina analisada. Os valores de cota, em destaque, constam no projeto da usina, para os demais valores de cota, a área foi calculada usando interpolação linear.

**Tabela 1 - Pontos “área  $\times$  cota  $\times$  volume”.**

Área (km <sup>2</sup> )	Cota (m)	Volume (hm <sup>3</sup> )	Nível	Característico
237,3	375,3	137,3		
317,3	377,3	417,3		
537,3	382,3	1867,3		
1037,3	387,3	5117,3		
1975,3	392,3	11962,3		
2181,3	394,3	15844,3	Mínimo	
2212,2	394,6	16462,1	Máximo	
2459,4	397,0	21738,5	Maximorum	
2490,3	397,3	22439,8		
2770,5	400,3	29919,1	Coroamento	
2957,3	402,3	35372,3		

Foi ajustado um polinômio aos pontos “área  $\times$  cota” da Tabela 1. Na Figura 2, mostra-se uma comparação do polinômio oficial com o polinômio consolidado. Para a faixa de validade do polinômio, procurou-se incluir três pontos do levantamento original e os níveis mínimo, máximo e maximorum do reservatório. A precisão da área foi fixada igual ao dado de projeto, sem arredondamento.



**Figura 2 - Consolidação do Polinômio Área  $\times$  Cota.**

É possível perceber erros significativos do polinômio oficial em relação ao polinômio ajustado. Esse tipo de desvio tem impacto direto no cálculo da evaporação do reservatório utilizado nos modelos de planejamento da operação para médio e longo prazo.

### Polinômio Cota $\times$ Volume

O ajuste do polinômio cota  $\times$  volume é feito a partir dos pares "área  $\times$  cota" do polinômio apresentado no item anterior. Para cada um desses pares, devem ser refeitos os cálculos dos volumes de acordo com o método de Tronco de Prisma.

Foi ajustado um polinômio aos pares "cota  $\times$  volume" da Tabela 1, cujos valores de volume foram recalculados. Na Figura 3, mostra-se uma comparação do polinômio oficial com o polinômio consolidado. A faixa de validade e a precisão das variáveis seguem o mesmo padrão do polinômio "área  $\times$  cota".

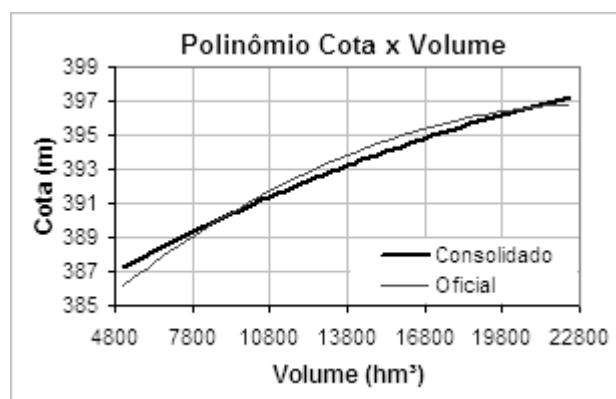


Figura 3 - Consolidação do Polinômio Cota  $\times$  Volume.

Essa diferença entre o polinômio cota  $\times$  volume oficial e ajustado se reflete no cálculo do balanço hídrico do reservatório da usina. Como consequência, não só o volume final de um período, como também as vazões afluentes registradas na base, tornam-se comprometidos e precisam ser recalculados.

### Polinômio Cota $\times$ Defluência

Para a consolidação do polinômio cota  $\times$  defluência são necessários os pares "nível de jusante  $\times$  vazão defluente" registrados pela companhia por um período. As leituras do nível do canal de fuga devem ter periodicidade horária e precisão de centímetros, sem arredondamentos. É importante que o

período escolhido seja recente, para representar a atual situação do leito do rio à jusante. Deve-se ter conhecimento do comportamento do canal para as maiores cheias do histórico, visando estabelecer os limites máximos.

Grafando-se os pares de pontos de nível jusante em função da vazão defluente, pode-se ajustar uma função polinomial à nuvem de pontos da operação do canal. O polinômio deve ser extrapolado até a vazão correspondente à capacidade dos vertedouros para que a faixa de validade considere todos os valores possíveis de vazões defluentes. Deve-se indicar a faixa de validade da função, pois fora dela poderão ocorrer inflexões do polinômio ajustado, causando grandes erros na representação do canal de fuga.

Na Figura 4, mostra-se uma comparação do polinômio cota  $\times$  defluência oficial e consolidado. Os pequenos círculos representam os pares horários de "nível de jusante  $\times$  vazão defluente" para o período de 01/set/2006 a 31/ago/2007. Esse período corresponde a um ano completo, demonstrando a sazonalidade hidrológica e incluindo uma das maiores cheias do histórico, ocorrida em jan/2007.

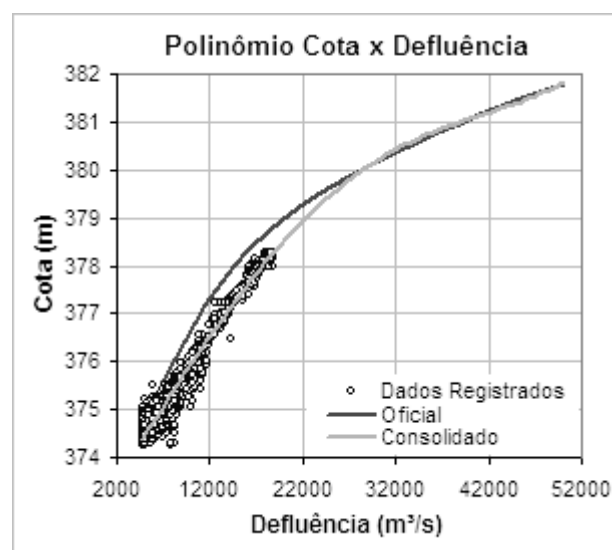


Figura 4 - Consolidação do Polinômio Cota  $\times$  Defluência.

Para a consolidação, usou-se a seguinte técnica. Primeiro foi ajustado um polinômio à nuvem de pontos disponível na base. De acordo com a nuvem de pontos, a faixa de validade desse polinômio era de 374,76m até 378,64m. Esse polinômio precisava ser extrapolado até a capacidade máxima do vertedor, 50000 m³/s. Porém, não havia registros na base para o intervalo de 378,65m até 381,77m. Então, foram adicionados os pontos do polinômio

oficial para esse intervalo sem registro e um segundo polinômio foi ajustado para a faixa completa. O benefício dessa técnica de ajuste é a obtenção de um único polinômio o qual é ao mesmo tempo coerente para os pontos “nível  $x$  vazão” da base e coerente para o intervalo no qual não há registros de operação.

Nota-se que o polinômio oficial tem quase toda a sua trajetória fora da nuvem de pontos. Isso causa erros acumulativos na queda bruta calculada pelos modelos de planejamento da operação, comprometendo o resultado matemático da função de produção, Equação (1). Na situação específica da Figura 4, na qual o polinômio cota  $x$  defluência oficial mantém-se acima dos pontos registrados, a tendência do simulador é calcular uma vazão turbinada acima da real, a fim de compensar a diminuição da queda líquida e, dessa forma, aproximar-se da meta de geração elétrica.

### Função de Potência Máxima

Para uma boa representação dos limites operativos da usina pode-se efetuar testes de potência máxima, procurando-se períodos com quedas baixas. Deve-se medir a potência máxima, a abertura do distribuidor e os níveis de montante e jusante. É importante observar as faixas proibidas devido à vibração ou cavitação na turbina. Na falta de testes, é possível, preliminarmente, ajustar as funções de potência e engolimento máximos analisando os dados históricos.

Grafando-se os pontos de potência verificada em função da queda bruta, pode-se visualizar a curva de potência máxima como sendo a envoltória da nuvem de pontos. Dividindo-se o valor de potência máxima pelo número de máquinas em operação, obtém-se o ajuste da curva para um conjunto turbinador.

Na Figura 5, apresenta-se o ajuste da função de potência máxima. Os pequenos círculos representam os pares “potência verificada  $x$  queda bruta” registrados, em base horária, na operação da usina, também no período de 01/set/2006 a 31/ago/2007. O traço consolidado superior representa o limite operativo da usina, para o traço inferior uma máquina encontra-se parada.

Analisando o gráfico, percebe-se que o valor de potência máxima oficial nunca foi atingido pela usina, nem mesmo quando esta operou com todas as máquinas na queda efetiva. Isso impõe um risco ao sistema, pois nos resultados dos modelos de operação, acredita-se que exista uma disponibilidade de geração que não é real.

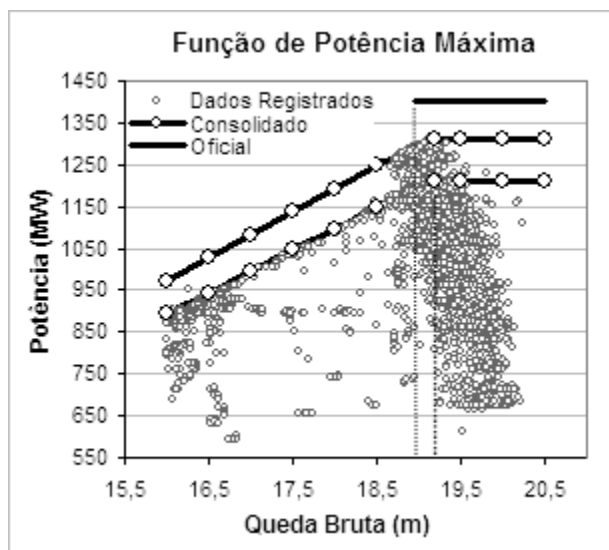


Figura 5 - Consolidação da Função de Potência Máxima.

### Função de Engolimento Máximo

Com um procedimento semelhante ao apresentando no item anterior, grafando-se os pontos de vazão turbinada em função da queda bruta, pode-se visualizar a curva de engolimento máximo como sendo a envoltória da nuvem de pontos. Dividindo-se o valor da vazão turbinada máxima pelo número de máquinas em operação, obtém-se o ajuste da curva para uma turbina.

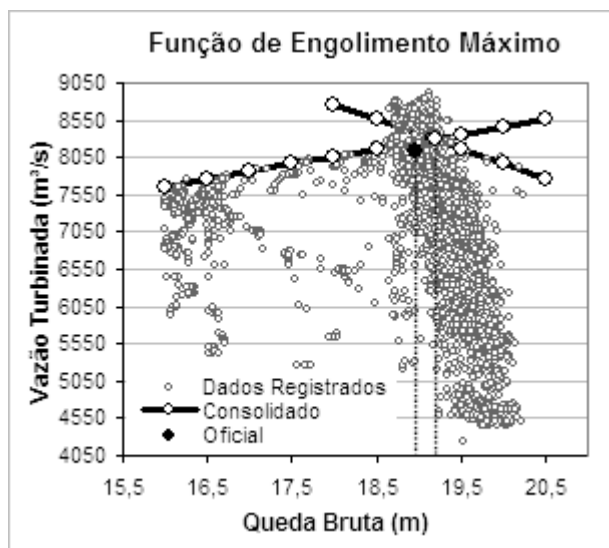


Figura 6 - Consolidação da Função de Engolimento Máximo.



Na Figura 6, apresenta-se o ajuste na função de engolimento máximo. Os pequenos círculos representam os pares “vazão turbinada x queda bruta” registrados pela companhia no mesmo período. Observando o conjunto de pontos, nota-se que os traços consolidados representam o limite da usina quando uma de suas máquinas está parada. Os pontos acima dos traços são registros de operação em situações nas quais todas as máquinas estavam ligadas.

Analisando o gráfico, percebe-se que o valor de engolimento máximo oficial é menor do que o real, para um mesmo número de máquinas em operação. Dessa forma, os modelos de planejamento da operação podem não alcançar a meta de geração, a não ser que superestimem o rendimento das máquinas.

#### Função de Rendimento Global

Para calcular a função de rendimento global das máquinas envolvidas na operação, as empresas têm duas opções. A primeira opção faz uso das funções de rendimento da turbina, do gerador e da perda hidráulica. A segunda, entretanto, é baseada nos dados de pós-operação registrados pela companhia: potência gerada, queda bruta e vazão turbinada. Em geral, a margem de erro das funções de rendimento é baixa, por isso as empresas podem utilizar a primeira opção. Porém, para aquelas que possuem um método razoavelmente preciso de medição de vazão, a segunda opção é mais interessante.

Para a primeira opção, o cálculo da matriz de rendimento global faz uso do gerador da função de rendimento global, descrito na segunda seção. Esse gerador apresenta, entre outras coisas, o rendimento global das máquinas em função da queda bruta e da potência média.

Para a obtenção da mesma função usando os dados dinâmicos registrados pela companhia em um determinado período, pode-se, por exemplo, utilizar a ferramenta “Solver” do Excel, para otimizar as células da matriz de rendimento global de modo a minimizar a soma do erro quadrático entre a vazão turbinada registrada pela usina e a vazão turbinada calculada com base nessa matriz.

Na Figura 7, apresenta-se a matriz de rendimento global calculada para a usina analisada usando o gerador da função de rendimento global.

Para aplicar o conceito de rendimento global aos modelos existentes no setor elétrico, basta zerar os coeficientes de perda hidráulica das usinas e substituir a matriz de rendimento da turbina pela matriz de rendimento global.

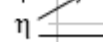
p h <sub>c</sub>	CURVA COLINA GLOBAL								
	14	15	16	17	18	19	20	21	22
30	0,881	0,883	0,885	0,886	0,885	0,889	0,889	0,888	0,885
40	0,885	0,888	0,891	0,892	0,895	0,894	0,898	0,899	0,895
50	0,879	0,885	0,890	0,895	0,899	0,900	0,904	0,902	0,901
60	0,863	0,871	0,881	0,888	0,897	0,899	0,902	0,904	0,906
70		0,856	0,869	0,880	0,891	0,896	0,901	0,901	0,903
80			0,849	0,866	0,880	0,890	0,894	0,899	0,902
90				0,847	0,867	0,881	0,887	0,893	0,897
100					0,849	0,865	0,877	0,886	0,891
110							0,868	0,874	0,882

Figura 7 - Matriz de Rendimento Global.

#### IMPACTO DA CONSOLIDAÇÃO DOS DADOS PARA OS MODELOS DE PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO

Com o objetivo de analisar o impacto da consolidação dos dados para os modelos de planejamento da operação em uso no setor elétrico brasileiro foram utilizados: o gerenciador de dados e o simulador da operação de usinas hidrelétricas, descritos anteriormente. Os dados de pós-operação registrados na base da usina analisada foram comparados aos dados resultantes da simulação da operação para julho/2007. A comparação foi feita em duas situações. Na primeira, o simulador foi alimentado com os dados oficiais do setor elétrico. Na segunda o simulador utilizou os dados consolidados da usina de acordo com a metodologia proposta neste trabalho. A análise é apresentada sob a forma gráfica e de tabelas.

Sob a forma gráfica são mostradas as trajetórias de geração, nível de montante e vazão turbinada. Os erros nos níveis de jusante ou nas quedas bruta se refletem na trajetória de nível de montante. Em relação às vazões, duas considerações são importantes. Primeiro, não houve vertimento no período, portanto a trajetória da vazão defluente é igual à da vazão turbinada. Segundo, as vazões afluentes registradas na base são fornecidas como entrada de dados ao simulador e, portanto, não foram alvo de consolidação e não necessitam comparação.

#### Dados Registrados x Simulação com Dados Oficiais

Na Figura 8, comparam-se as trajetórias registradas pela usina e simuladas com dados oficiais. Nota-se que a meta de geração não foi cumprida

pelo simulador, pois por várias vezes o nível d'água do reservatório atingiu o limite mínimo de 394,26 m, justificando as baixas vazões turbinadas. A explicação para o gasto excessivo de água do reservatório deve-se, principalmente, ao problema com o polinômio cota  $\times$  defluência oficial, apresentado na seção anterior.

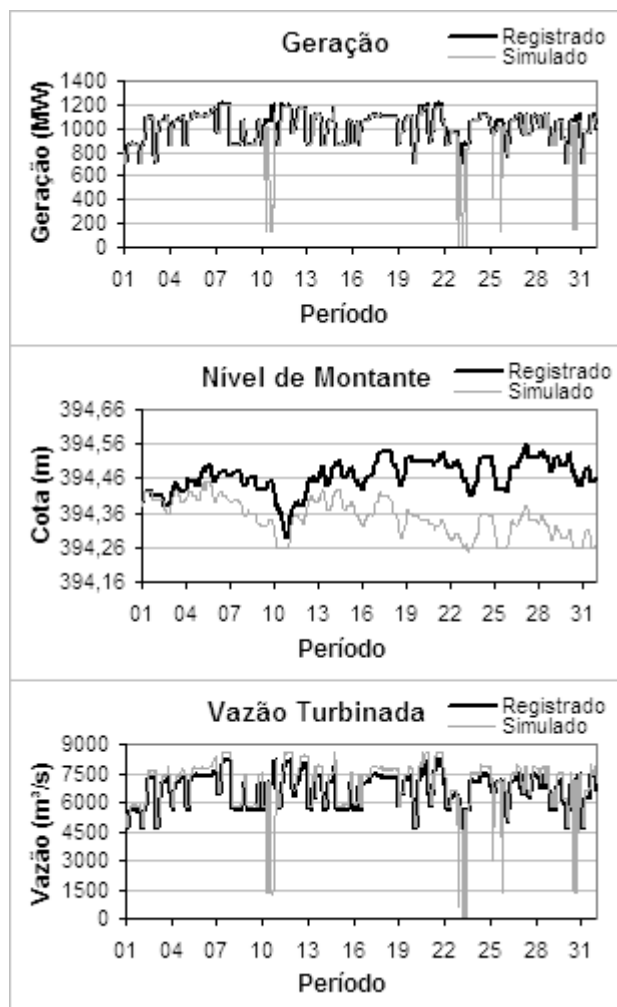


Figura 8 - Dados registrados  $\times$  Simulação com dados oficiais.

#### Dados Registrados $\times$ Simulação com Dados Consolidados

Na Figura 9, comparam-se as trajetórias registradas pela usina e simuladas com dados consolidados. Para facilitar a análise, a escala dos gráficos dessa figura é a mesma da anterior. Nas três trajetórias: de geração, de nível de montante e de vazão turbinada; nota-se uma forte aderência entre dados

de pós-operação e sua reprodução via simulação.

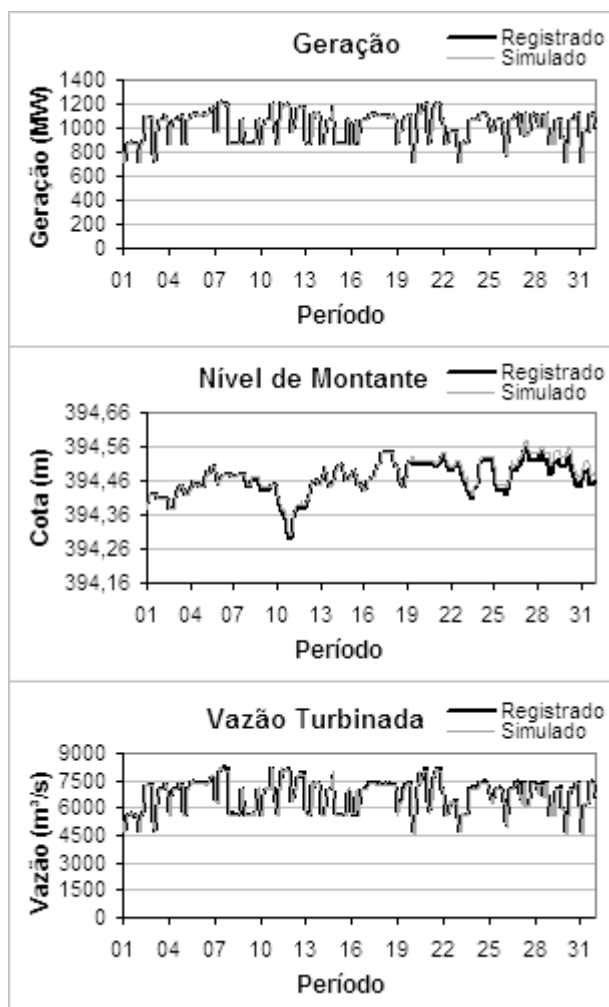


Figura 9 - Dados registrados  $\times$  Simulação com dados consolidados.

Com o objetivo de fazer uma análise numérica dos resultados apresentados anteriormente, na Tabela 2, apresenta-se um resumo estatístico focado na soma e na média do erro quadrático entre as variáveis registradas e simuladas envolvidas no planejamento da operação.

Os números da Tabela 2 evidenciam a melhoria na qualidade dos dados da usina, obtida após o processo de consolidação. Algumas pequenas diferenças apresentadas na terceira coluna da tabela são explicadas pela precisão de 0,1 MW utilizada pelo simulador. As diferenças não tão pequenas dessa coluna, relacionadas ao nível de jusante e à vazão turbinada, justificam-se pelo fato do canal de fuga de uma usina hidrelétrica ser representado por uma

nuvem de pontos. Acredita-se que uma técnica “precisa” de medição de vazão, reduza o espaçamento entre os pontos dessa nuvem, melhorando ainda mais os resultados.

**Tabela 2 - Resumo Estatístico.**

<b>Dados Registrados x Simulados</b>			
<b>Dado</b>	<b>Oficial</b>	<b>Ajustado</b>	<b>Redução</b>
<b>Soma do erro quadrático</b>			
$\emptyset(x)$	13,40	0,13	99,05 %
$\theta(u)$	617,03	37,31	93,95 %
Q	764.398.035,90	5.320.512,15	99,30 %
P	18.151.757,75	2,84	100,00 %
$\eta^G$	2,48	0,13	94,57 %
<b>Média do erro quadrático</b>			
$\emptyset(x)$	0,13	0,01	
$\theta(u)$	0,91	0,22	
q	1.013,62	84,56	
p	156,20	0,06	
$\eta^G$	0,06	0,01	
<b>Redução média da soma do erro quadrático</b>			<b>97,37 %</b>

## RESUMO E CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma metodologia para consolidação de dados de usinas hidrelétricas. A escolha dos dados estáticos para o processo de consolidação é devida à influência que essas informações têm na construção da base dinâmica de uma usina. A metodologia apresentada é composta por seis procedimentos que fazem uso de um gerenciador de dados, um construtor de consultas, um gerador da função de rendimento global e uma planilha eletrônica. Os procedimentos são baseados nos dados registrados pela companhia que administra a operação da usina e por isso, não requerem investimentos financeiros.

A metodologia foi aplicada aos dados de uma grande usina hidrelétrica brasileira. Após o ajuste dos dados dessa usina, foram executados testes com um simulador da operação de usinas hidrelétricas, em uso no setor elétrico. Os testes tinham dois objetivos. O primeiro era avaliar a eficiência da metodologia de consolidação dos dados. O segundo era analisar o comportamento desse modelo computacional de planejamento da operação alimentado, inicialmente, com informações oficiais e, posteriormente, com dados consolidados. A partir dos resultados computacionais, foram obtidas duas conclu-

sões importantes. A primeira confirma que a qualidade dos dados tem grande influência sobre o resultado de um modelo, principalmente no que se espera sobre a representação matemática das condições reais do comportamento do sistema modelado. A segunda conclusão é que a metodologia proposta é eficiente, pois apresentou, para a usina analisada, uma redução média dos erros entre as variáveis registradas e simuladas de 97,37%.

A contribuição deste trabalho não se restringe ao desenvolvimento de uma metodologia pioneira de consolidação de dados de usinas hidrelétricas. Os modelos computacionais, utilizados pelo setor elétrico, para otimização, simulação e previsão de vazões, dependem de dados de qualidade para apresentarem resultados confiáveis. Portanto, a qualidade dos dados obtida com o uso da metodologia proposta neste trabalho contribui, de forma geral, para a escolha de uma política de operação econômica e confiável para o sistema hidrelétrico brasileiro.

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) os quais, em diferentes momentos, fomentaram os estudos de doutorado do primeiro autor do trabalho.

## REFERÊNCIAS

- BALTAR, A. M., AND FONTANE, D. G. (2008). "Use of multiobjective particle swarm optimization in water resources management." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(3), 257-265.
- BARROS, M. T. L., TSAI, F. T-C., YANG, S-L, LOPES, J. E. G., AND YEH, W. W-G. (2003). "Optimization of large-scale hydropower system operations." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(3), 178-188.
- BLOCH, S. C. (2003). "Excel for engineers and scientists." Wiley, EUA.
- BOWMAN, J. S., EMERSON, S. L., AND DARNOVSKY, M. (1996). "The practical SQL handbook – Using Structured Query Language." Addison Wesley Professional, MA, EUA.

- CCEE. "Câmara de Comercialização de Energia Elétrica" <<http://www.ccee.org.br>>
- CICO GNA, M. A. (1999). "Modelo de planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos a usinas individualizadas." Dissertação de mestrado, UNICAMP, SP, Brasil.
- CICO GNA, M. A. (2003). "Sistema de suporte à decisão para o planejamento e a programação da operação de sistemas de energia elétrica." Tese de doutorado, UNICAMP, SP, Brasil.
- COLNAGO, R. G. (2007). "Modelo de despacho ótimo com tratamento individual de unidades geradoras em usinas hidrelétricas". Dissertação de mestrado, UNICAMP, SP, Brasil.
- DINIZ, A. L., ESTEVES, P. P. I., AND SAGASTIZÁBAL, C. A. (2007). "A mathematical model for the efficiency curves of hydroelectric units". IEEE - Power Engineering Society General Meeting, ID: 10.1109/PES.2007.385632, p.1-7, Tampa, FL, EUA.
- ENCINA, A.S.A., OHISHI, T., AND SOARES, S. (2002). "Optimal dispatch of generating units of the Itaipu hydroelectric plant." Journal IEEE Transactions on Power Delivery, 17(1), 154-158.
- ELMASRI, R., AND NAVATHE, S. (2000). "Fundamentals of database systems." Addison Wesley Professional, MA, EUA.
- HIDALGO, I. G. (2004). "Sistema de consultas para a análise de dados cadastrais de usinas hidrelétricas." Dissertação de mestrado, UNICAMP, SP, Brasil.
- HIDALGO, I.G., SOARES, S., FONTANE, D.G., CICO GNA, M.A. (2009a). "Management and Analysis of Data from Hydroelectric Plants". IEEE - Power Systems Conference & Exhibition (PSCE), p. 1-6, Seattle, WA, EUA.
- HIDALGO, I.G., FONTANE, D.G., SOARES, S., CICO GNA, M.A. (2009b). "Computer Aided System for Managing, Controlling and Analyzing Data from Hydroelectric Plants". ASCE - World Environmental & Water Resources Congress (EWRI), p. 4749-4757, Kansas, MI, EUA.
- HIDALGO, I.G., FONTANE, D.G., SOARES, S., CICO GNA, M.A. (2009c). "A Simulator of the Hydroelectric Plants Operation as Tool for Analyzing Data". World Congress on Computer Science and Information Engineering (CSIE), p. 14-18, Anaheim, CA, EUA.
- HIDALGO, I.G., SOARES, S., FONTANE, D.G., CICO GNA, M.A., LOPES, J.E.G. (2009d). "Impact of the Data Quality from Hydroelectric Plants in the Past Operation Analysis using a Middle Term Simulation Tool". International Multi-Conference on Engineering and Technological Innovation: IMETI - p. 113 a 117, Orlando, FL, EUA.
- HORSTMANN, C. S. (1997). "Practical object-oriented development in C++ and Java." John Wiley & Sons, Inc, NY, EUA.
- HOLLINGWORTH, J., BUTTERFIELD, D., SWART, B., AND ALLSOP, J. (2001). "C++ Builder 5 developer's guide." Sams Publishing, EUA.
- JOSUTTIS, N. M. (1999). "The C++ standard library – A tutorial and reference." Addison Wesley Professional, MA, EUA.
- LOPES, J. E. G. (2001). "Otimização de sistemas hidroenergéticos." Dissertação de mestrado, USP, SP, Brasil.
- LOPES, J. E. G. (2003). "A Relevância dos Modelos de Otimização e Simulação do Sistema Hidrelétrico Brasileiro". In: Ildo Luís Sauer. (Org.). A Reconstrução do Setor Elétrico Brasileiro. São Paulo: Paz e Terra, p. 289-300.
- LOPES, J. E. G. (2007). "Modelo de planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos de produção de energia elétrica." Tese de doutorado, USP, SP, Brasil.
- LIND, D. A., MARCHAL, W. G., AND WATHEN, S. A. (2006). "Statistical techniques in business and economic." McGraw-Hill College, MA, EUA.
- OLIVEIRA, L. C. K., AND CANELLAS, A. V. B. (1999). "Importância de dados hidrometeorológicos confiáveis no gerenciamento de recursos hídricos". Simpósio de Gestão de Recursos Hídricos de Gramado, RS, Brasil.
- PEREIRA, M. V. F., AND PINTO, L. M. V. G. (1985). "Stochastic optimization of a multireservoir hydroelectric system: a decomposition approach." Journal Water Resources Research, 21(6), 779-792.
- RESENDE, M. F. (2007). "A variação das características hidráulicas em condutos forçados devido à infestação pelo *Limnoperna Fortunei*". Dissertação de mestrado, UFMG, MG, Brasil.
- RODRIGUES, M. S. (2002). "Controle de qualidade on-line de dados hidrológicos teletransmitidos." Dissertação de mestrado, UFI, MG, Brasil.
- VINHAL, C. D. N. (1998). "Sistema de apoio à decisão para o planejamento da operação energética de sistemas de energia elétrica." Tese de doutorado, UNICAMP, SP, Brasil.

## Procedures for the Consolidation of Data from Hydroelectric Plants Based on Recorded Information

### ABSTRACT

This paper presents a sequence of procedures for the consolidation of data from hydroelectric plants. The procedures are based on static and dynamic data recorded by the company that manages plant operation. The proposed methodology uses a data manager, a queries builder, a generator of the function overall efficiency and an elec-

*tronic spreadsheet. It has been applied to the data from a large Brazilian hydroelectric plant which is part of the National Interconnected System and its operation is coordinated by the Electric System National Operator. The benefits of data consolidation are analyzed using a simulator of the hydroelectric plant operation. This simulator is used in an attempt to reproduce the past operation of the plant, initially using official data and then consolidated data. The results show significant improvements in terms of data quality contributing to the efficiency and reliability of the computational models in use by the Brazilian energy sector to plan the operation.*

**Key-words:** *Data Quality, Overall yield, Hydroelectric Plants.*