



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GOP/28
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO -IX

GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS- GOP

**INDICADORES DE QUALIDADE APLICADOS À PROGRAMAÇÃO DIÁRIA DA OPERAÇÃO DE USINAS
HIDRELÉTRICAS**

**Leandro Andrade Nacif(*)
COPEL G&T**

**Hugo Mikami
COPEL G&T**

RESUMO

Este trabalho apresenta um método de avaliação das decisões tomadas e implementadas na etapa de programação diária da operação de usinas hidrelétricas. Para tal serão definidos indicadores como ferramentas de gestão do processo buscando mensurar a qualidade da programação da geração e também direcionar os esforços dos profissionais envolvidos na melhoria contínua, sinalizando quais os aspectos que merecem atenção e podem ser melhorados.

PALAVRAS-CHAVE

Usina Hidrelétrica, Programação Diária, Pós Operação, Indicadores de Qualidade

1.0 - INTRODUÇÃO

A programação diária da operação é a etapa do planejamento em que os agentes de geração interagem com o Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS acertando os montantes a serem despachados em cada usina do SIN. Após as negociações os montantes devem ser distribuídos para cada máquina de cada usina de cada agente de geração. Nesta distribuição o agente tem total liberdade, desde que atenda ao que foi negociado com o ONS. Devido à intensa rotina, sistemas computacionais são largamente utilizados para otimização, manipulação e transferência de dados entre os agentes e o operador. Desta maneira, em uma rotina intensa, deve se otimizar um problema de porte considerável em tempo hábil (1).

A regulamentação atual do SEB desvincula quase toda a remuneração do agente gerador da operação individual do seus ativos. A performance sistêmica e a gestão comercial determinam a maior parte da receita do gerador, porém, existe uma pequena tarifa, chamada Tarifa de Energia de Otimização - TEO que remunera cada MW.h gerado individualmente em cada usina. Um planejamento otimizado então é capaz de elevar a qualidade da performance do sistema e ainda aumentar os montantes de geração de cada usina, que, remunerados a TEO, podem contribuir para o EBTIDA da empresa em até 10 %.

Para que esta contribuição se realize, o agente gerador deve dispor de ferramentas computacionais de alta qualidade e equipes de alto padrão. A gestão deste processo pode contribuir para a lapidação tanto da ferramenta computacional, quanto da equipe que utilizará a ferramenta, em busca do nível de excelência nesta atividade.

Esta excelência ora almejada será perseguida por meio de uma gestão do processo que indicará quais são os aspectos do processo que merecem atenção e devem sofrer melhorias. Esta gestão observará as atividades que

(*) Rua José Izidoro Biazetto, n° 158 – sala 261 - Bloco A – CEP 81200-240 Curitiba, PR, – Brasil
Tel: (+55 41) 3331-3361 – Fax: (+55 41) 3331-3170 – Email: leandro.nacif@copel.com

envolvem o processo da programação diária, avaliará quantitativamente o desempenho e poderá até estabelecer padrões ou metas.

Para tal pleito foi desenvolvida uma estrutura de indicadores que traduzem a qualidade da programação da geração, através do uso de dados pós operativos e sua análise com foco energético.

Na etapa de programação diária, conforme apresentado, distribui-se os montantes de geração para cada máquina de cada usina. Esta distribuição é importante uma vez que influencia os pontos de operação das máquinas que, por sua vez, definem o rendimento da turbina e do gerador, estabelecendo a produtividade instantânea da usina. Além da produtividade, os montantes de geração definidos nas tratativas com o ONS definem diretamente os volumes vertidos e as alturas de queda em uma determinada usina e em todas as outras com as quais ela possuir acoplamento hidráulico.

Desta maneira, os indicadores estarão focados em avaliar estas três variáveis energeticamente importantes:

- Vertimentos (desperdícios de água)
- Produtividade (relação entre o MW gerado e a quantidade de água utilizada para esta geração)
- Coordenação hidráulica das cascatas

Estes indicadores analisarão os três aspectos e sinalizarão a qualidade das decisões segundo estas três variáveis. A próxima sessão apresenta com detalhes a formulação de cada indicador, bem como insights a respeito de sua interpretação.

2.0 - METODOLOGIA

Esta sessão apresenta uma introdução teórica a respeito de indicadores, elencando o que são, para que servem, quais são os atributos desejáveis, quais os tipos, etc. Além disto, apresenta a formulação de cada indicador, a forma de interpreta-lo e a estrutura dos indicadores elucidando o painel de bordo.

2.1 Indicadores

A Fundação Nacional da Qualidade, em (2), apresenta uma revisão sobre diversas publicações a respeito de indicadores e será a principal referência para o este trabalho.

Os indicadores podem ser do tipo taxa ou índice e também podem ser classificados como *Driver* ou *Outcome* - Diferentes publicações utilizam terminologias distintas para esta última classificação. Chamam de *Leading*, *Direcionador*, *Causadores*, *Item de Verificação*, etc... os indicadores tipo *Driver* e chamam de *Lagging*, *Resultante*, *de Efeito*, *Item de Controle*, etc... os indicadores tipo *Outcome*. Utilizaremos apenas os termos *Driver* e *Outcome*. Segue uma rápida explicação sobre cada tipo de indicador mencionado, também apresentada em (2):

- *Taxa* - Tipo de indicador que se caracteriza por uma divisão entre duas informações de mesma grandeza gerando um valor que pode ser expresso como porcentagem, bastando apenas a multiplicação do resultado da divisão por 100%. É considerado um bom indicador.
- *Índice* - Tipo de indicador que se caracteriza por uma divisão entre duas informações de grandezas distintas, não podendo ser expresso em porcentagem. O Índice é considerado um indicador ideal, cuja utilização deve ser incentivada.
- *Driver* - Indicador também conhecido como construtor, de plantação, de meio, de esforço, etc... Caracteriza-se pela possibilidade de ser gerenciado pela cobrança, já que consiste em um esforço particularizado capaz de construir outro indicador maior.
- *Outcome* - Indicador também conhecido como construído, de colheita, de fim, de resultado, etc.. Caracteriza-se por ser um indicador menos gerenciável e que se origina da torcida dos gestores, caso não haja desdobramentos em indicadores *drivers*.

Uma estrutura de indicadores é considerada "balanceada" quando foi implementada de forma coerente e obedecendo o fundamento de que para cada indicador *outcome* deve existir pelo menos um indicador *driver*. Além disto, eles devem estar alinhados com o referencial estratégico da organização e, se necessário, podem participar da composição de outros indicadores relativos à níveis hierárquicos superiores.

No nível operacional, um processo de alto desempenho possui as seguintes características:

- Eficaz - Atende todos os requisitos bem como as diretrizes impostas
- Adaptável - Ajusta-se às mudanças no cenário

- Eficiente - Boa relação produto/insumo
- Controlável - Fácil de implementar e intervir
- Monitorável - Tem pontos de medição para acompanhamento
- Formal - Atividades mapeadas e documentadas

2.2 Primeiro Indicador

$$I_1 = \frac{Ger_{ver}}{\Delta Ear_{qa}} * 100\% \quad (1)$$

I_1 - Indicador 1

Ger_{ver} – Geração verificada em MJ (média diária).

ΔEar_{qa} – Variação da energia armazenada, calculada pela Equação 2, considerando a vazão afluente média diária como já armazenada no reservatório.

$$\Delta Ear_{qa} = \int_{v_{min}}^{v_i} \rho H(v, q) dv - \int_{v_{min}}^{v_f} \rho H(v, q) dv \quad (2)$$

ρ – Produtividade específica (MW/m³/s)/m

H – Altura de queda líquida (m), em função do volume armazenado v_j , e vazão defluente q_j considerada constante como premissa.

v_i – Volume armazenado inicial em m³ adicionando a vazão afluente (volume afluente no período)

v_f – Volume armazenado final em m³

I_1 é um indicador do tipo taxa e também um *outcome*. Com a energia armazenada calculada utilizando-se a produtividade específica que reflete valores médios das curvas de rendimento do gerador e turbina, este indicador deve assumir valores próximos a 100% (3). Caso assuma valores maiores que 100%, pode-se inferir que os pontos de operação das máquinas da usina estiveram acima da média representada pela produtividade específica e caso contrário, abaixo da média. Este indicador mede a qualidade da distribuição do número de unidades geradoras sincronizadas a cada meia hora do dia (padrão utilizado na programação diária).

À I_1 estão relacionados os seguintes indicadores *drivers*:

- Número de paradas e partidas de unidades geradoras para 1 dia
- Volume armazenado (% Vu)
- Vertimentos médios diários

Importante ressaltar que I_1 não é capaz de avaliar o ganho de altura de queda, uma vez que não percebe um horizonte muito longo e a altura de queda corrente é contabilizada tanto no numerador quanto no denominador. Além disto, ele está voltado para a análise de cada usina de forma individualizada, não avaliando também a sinergia da operação com outros aproveitamentos.

2.3 Segundo Indicador

$$I_2 = \frac{Ger_{total-ver}}{\Delta Ear_{total}(qa_{total})} \quad (3)$$

$Ger_{total-ver}$ – Geração média diária em MJ total verificada

$\Delta Ear_{total}(qa_{total})$ – Variação da energia armazenada total do sistema, calculada pela Equação 4, considerando a vazão afluente média diária como já armazenada.

$$\Delta Ear_{total} = \sum_{i=1}^N \int_{v_{min_i}}^{v_i} \left[\sum_{j=i}^{n_j} \rho_j H_j(v_j, q_j) \right] dv_i - \sum_{i=1}^N \int_{v_{min_i}}^{v_f} \left[\sum_{j=i}^{n_j} \rho_j H_j(v_j, q_j) \right] dv_i \quad (4)$$

$E_{ar_{total}}$ – Energia armazenada total (MJ)

N – Número total de aproveitamentos (evoluindo em ordem de posição nas cascatas)

n_j – Número de aproveitamentos a jusante de i

V_{\min_i} – Volume mínimo armazenado na usina i

v_{i_i} – Volume armazenado inicial na usina i em m^3 adicionando a vazão afluente (volume afluente no período) (m^3)

v_{f_i} – Volume armazenado final (m^3)

ρ_j – Produtividade específica (MW/ m^3/s)/m

H_j – Altura de queda líquida (m), em função do volume armazenado v_j , e vazão defluente q_j considerada constante como premissa.

l_2 é um indicador do tipo taxa e também um *outcome*, assim como l_1 . Com a energia total armazenada calculada utilizando-se a produtividade específica que, por sua vez, reflete valores médios das curvas de rendimento do gerador e turbina, este indicador também deve assumir valores próximos a 100% (3) (4). Caso assumam valores maiores que 100%, pode-se inferir que os pontos de operação das máquinas da usina estiveram acima da média representada pela produtividade específica e, além disto, os montantes gerados em cada usina exploraram a sinergia decorrente do acoplamento hidráulico dos reservatórios ocasionando um débito menor na energia armazenada total, representando uma boa a performance conjunta das usinas (5). Caso contrário, ou a operação foi de baixa qualidade no tocante às curvas de rendimento ou com pouca sinergia entre os aproveitamentos. Este indicador mede principalmente a qualidade das decisões de geração no tocante à sinergia entre os aproveitamentos, uma vez que l_1 já mede a qualidade com relação aos pontos de operação das máquinas. Desta maneira, l_1 se torna naturalmente um *driver* para l_2 . Segue a lista completa de *drives* para l_2

- l_1 (média dos valores individuais para cada usina)
- Produtividade média diária
- Vertimentos médios diários

2.4 Terceiro Indicador

$$I_3 = \frac{Ger_{total-ver}}{\Delta Ear_{total}(q_{a_{total}})} (Base\ anual) \quad (5)$$

$Ger_{total-ver}$ – Geração média anual em MJ total verificada

$\Delta Ear_{total}(q_{a_{total}})$ – Variação da energia armazenada total do sistema, calculada pela Equação 6, considerando a vazão afluente média anual como já armazenada.

$$\Delta E_{total} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^{n_j} k_j v_{ij} - \sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^{n_j} k_j v_{fj} \quad (6)$$

E_{total} – Energia armazenada total (MJ)

k_j – Produtividade média na usina j (MW/ m^3/s)

v_{ij} - Volume armazenado inicial na usina j em m^3 adicionando a vazão afluente (volume afluente no período) (m^3) corrigida por uma parcela proporcional ao desvio padrão da vazão afluente calculado pela Equação (7)

v_{fj} - Volume armazenado final na usina j em m^3

$$\left| \frac{S_a - S_{mlt}}{S_{mlt}} \right| * (q_{mlt} - q_a) \quad (7)$$

Onde S_a e q_a correspondem ao desvio padrão e média anual da vazão afluente e S_{mlt} e q_{mlt} correspondem ao desvio padrão e média da vazão de todo o histórico

I_3 é um indicador do tipo taxa e *outcome*. Sua função principal é analisar a efetividade das decisões tomadas no sentido de elevar as alturas de queda das usinas ao longo do tempo, por isto a base anual. Caso assuma valores maiores que 100% (3), significa que a altura de queda verificada é maior do que a altura de referência utilizada para o cálculo da produtividade média da usina (6), houve ganhos de sinergia e/ou ganhos por se operar em pontos de alto rendimento. Como os ganhos de sinergia e dos pontos de operação são avaliados por I_1 e I_2 estes se tornam naturalmente *drivers* de I_3 e permitem a avaliação do aspecto ganho de altura de queda através da observação de I_3 . Deste modo, os drivers relacionados a I_3 são:

- I_1
- I_2
- Vertimentos médios anuais
 - Desvio padrão das vazões médias diárias

O fato de se considerar já armazenada no reservatório a vazão afluyente, faz que com que I_1 , I_2 e I_3 sejam indicadores sensivelmente severos, uma vez que a vazão afluyente é incerta e eventualmente não é aproveitada em sua totalidade. Assim pode-se dizer que uma vazão afluyente com grande variabilidade, ou seja, alto desvio padrão, é análoga à uma matéria prima de baixa qualidade, pois não é totalmente aproveitada como insumo para produção. Para caracterizar este fato, o indicador *driver* vertimentos médios anuais tem a ele relacionado um outro indicador que é o desvio padrão da vazão afluyente.

Apresentados os indicadores, segue sua estrutura:

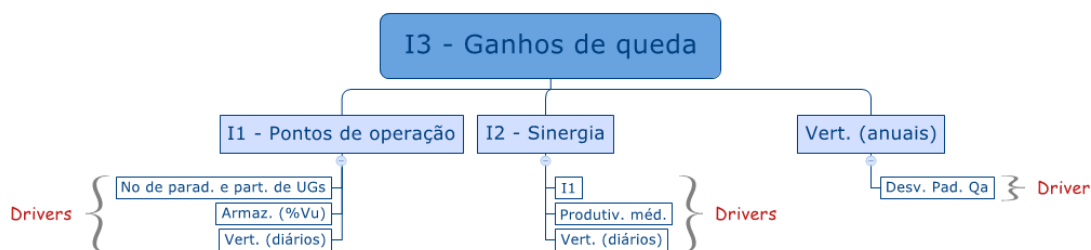


FIGURA 1 – ESTRUTURA DE INDICADORES

3.0 - RESULTADOS

Os indicadores foram calculados para o histórico de geração do parque gerador da COPEL apresentado na Figura 2, exceto as usinas destacadas em azul claro.

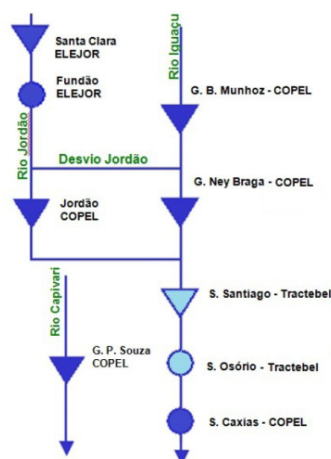


Figura 2 – Parque gerador da COPEL

As Figuras 3 e 4 apresentam os resultados para os indicadores I_1 e I_2 calculados para o ano de 2010 juntamente com seus *drivers*.

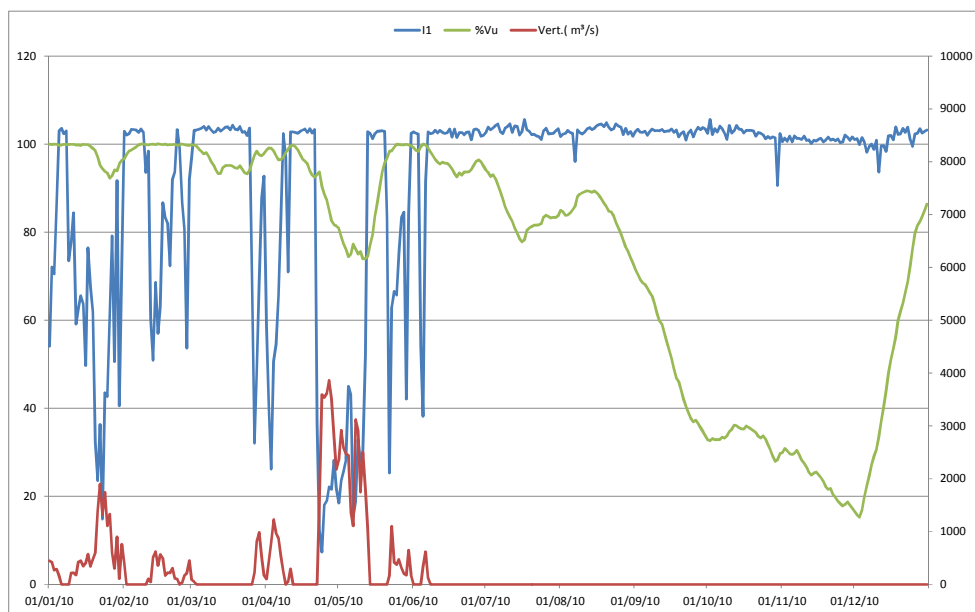


Figura 3 – Indicador I_1 calculado para o ano de 2010 (Foz do Areia)

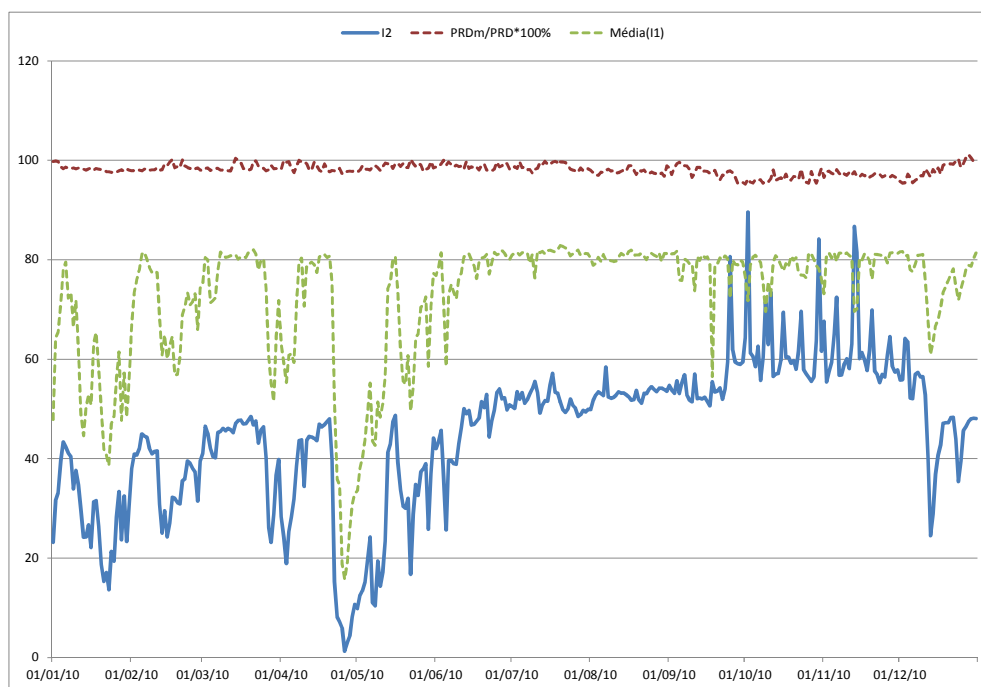


Figura 4 – Indicador I_2 calculado para o ano de 2010

No gráfico da Figura 3 observa-se a evolução do indicador de Foz do Areia ao longo do ano, bem como de seus drivers percentagem de armazenamento diário e vazão vertida média diária. Com relação à este gráfico podem-se tirar algumas conclusões:

- Quando ocorrem vertimentos o indicador cai vertiginosamente.
- Apesar de um severo deplecionamento a partir do mês de agosto, o indicador não foi afetado pela diminuição da altura de queda, o que está de acordo com o seu propósito. Uma sensível diminuição em seus valores pode ser verificada principalmente nos períodos de menor volume armazenado. Este fato se deve à curva colina da usina que possui valores menores de rendimentos nas regiões de menor altura de queda.

- Pode se verificar ainda um ripple no gráfico. Ele está relacionado com a variação do ponto médio diário de operação das máquinas, além de estar sujeito ao processo de determinação da vazão turbinada que calculada em função da geração e das medições das réguas no reservatório. Uma vazão medida em cada conduto aumentaria a credibilidade do indicador I_1 .

O Gráfico da Figura 3 mostra a evolução deste indicador também para o ano de 2010. Importante lembrar que este indicador se relaciona com todo o sistema e não com cada aproveitamento considerado de forma individual. Posto isto, seguem algumas conclusões:

- Nos períodos em que ocorrem vertimentos os valores são menores, assim como ocorre para I_1 . Quando estes vertimentos se encerram, os valores atingem um patamar médio superior.
- No período compreendido entre o final de setembro e início de dezembro, o indicador visitou os maiores valores. Uma rápida analisada nos indicadores drivers mostra que eles não sofreram alterações significativas neste mesmo período, portanto, não influenciaram seu aumento. Isto valida a indicação de que ocorreu maior sinergia na operação conjunta dos aproveitamentos.
- Os picos do indicador acontecem sistematicamente em dias não úteis. O que sugere uma maior facilidade em aumentar a sinergia em dias de carga reduzida no sistema.

Finalmente, a Tabela 1 apresenta uma análise da operação do sistema ao longo de 5 anos. Segundo a estrutura de indicadores apresentada, I_3 é o indicador *outcome* responsável pela análise e I_1 , I_2 e os vertimentos os seus respectivos drivers. Os vertimentos são apenas em Foz do Areia.

Tabela 1 – Indicador I_3 e respectivos drivers

Ano	I_3	I_1	I_2	Desv. Pad. Q	Vert. (m³/s)
2010	0,425	72,89	45,38	680	244
2011	0,416	70,07	43,35	723	254
2012	0,434	76,77	51,18	513	77
2013	0,452	74,31	42,35	679	109
2014	0,454	74,87	44,20	924	94

Seguem as conclusões a respeito da Tabela 1:

- Os melhores indicadores estão relacionados com a operação individualizada das usinas.
- Ao analisar o nível sinergia entre os aproveitamentos, observa-se indicadores com possibilidade de melhoria, entretanto, é importante ressaltar que trata-se de usinas com despacho centralizado que busca otimizar o sistema todo, e não apenas um subconjunto de usinas.
- Ao analisar I_3 observa-se também a possibilidade de melhorias, porém também relacionadas ao despacho centralizado. Este resultado era esperado. Para uma análise mais rigorosa, deveria se avaliar o conjunto completo de usinas do Sistema.
- O melhor ano foi o de 2014, pois obteve uma operação em pontos de maior rendimento, maior sinergia entre os aproveitamentos e um vertimento pequeno. Importante observar que este vertimento está relacionado ao elevado desvio padrão da vazão, o que confirma a inferência.
- O ano de 2011 foi o pior em todos os indicadores. Comparado com 2010, observa-se que a operação neste ano foi melhor tanto em termos de pontos de operação quanto em sinergia, apesar de vertimentos em montantes semelhantes.

4.0 - CONCLUSÃO

Analisar a operação passada de usinas hidrelétricas não é uma tarefa trivial, uma vez que depende de diversas variáveis e as usinas estão submetidas ao despacho centralizado. A estrutura de indicadores apresentada analisa as informações e isola as três variáveis energeticamente importantes apresentadas na introdução. Isoladamente, os indicadores *outcomes* não conseguem atingir o objetivo, o que cria a necessidade de avaliação dos *drivers*. Desta maneira I_1 , I_2 e I_3 , atendem aos requisitos de bons indicadores, avaliam em qual aspecto a qualidade das decisões pode ser melhorado e servem de referência para o desenvolvimento de outras formas de avaliação da qualidade da operação.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Nacif, L.A. “*Modelagem Econômica para a Tomada de Decisões na Programação Diária da Operação de Usinas Hidrelétricas*” – Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. 2013.
- (2) Fundação Nacional da Qualidade, “*Indicadores de Desempenho - Estruturação do Sistema de Indicadores Organizacionais*”. FNQ, 2012.
- (3) FORTUNATO, L. A. M; et al. “*Introdução ao planejamento da expansão e operação de sistemas de produção de energia elétrica*.” - Rio de Janeiro, Editora Universitária, Universidade Federal Fluminense, 1990.
- (4) SOARES, S.; CARNEIRO A.A.F.M, “*Optimal Operations Of Reservoirs for Electric Generation*” - IEEE Transactions on Power Delivery ,Vol. 6, No. 3, July 1991.
- (5) LABADIE, J. W. “*Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review.*” - Journal of Water Resources Planning and Management, 2004.
- (6) CEPEL. “*Modelo Newave – Manual de Referência*”. Rio de Janeiro, 2006.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Leandro A. Nacif – Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF, Brasil, 2005, concluiu o mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2013 e MBA em Gestão e Liderança pela Estação Business School, Curitiba, 2014. É Engenheiro da Companhia Paranaense de Energia – COPEL e atua na área de Programação Diária e Mensal da Operação Eletroenergética desde 2006.

Hugo Mikami – Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 1984 e especializou-se em Gestão Técnica de Concessionárias de Energia Elétrica também pela Universidade Federal do Paraná, 2001. É gerente da divisão de Planejamento e Estudos Eletroenergéticos da COPEL G&T e trabalha da COPEL desde 1985.