

## ESTIMATIVA DA GARANTIA FÍSICA DE USINAS HIDRELÉTRICAS COM DESPACHO NÃO CENTRALIZADO

Cláudio Siervi Mota Júnior  
Ivana Costa Nasser  
Marciano Morozowski Filho  
Odilon Luís Tortelli

*UFPR/WeSee*

### RESUMO

Contrapondo a geração histórica à garantia física das usinas hidroelétricas não despachadas pelo Operador Nacional do Sistema, observa-se que, recorrentemente, algumas destas usinas vêm gerando abaixo das suas respectivas garantias físicas. Neste contexto, tomando como base as diretrizes estabelecidas pelos agentes reguladores e considerando um histórico de vazões, apresentado no projeto básico da usina, propõe-se neste trabalho uma abordagem alternativa para o cálculo da garantia física destas usinas com despacho descentralizado, a partir do emprego da média harmônica.

Palavras-chave: regulação energética, garantia física, geração distribuída, média harmônica, energia assegurada, despacho não centralizado, pch.

### ABSTRACT

Comparing the electrical generation history with the physical guarantee of hydroelectric power plants not dispatched by the national system operator, it is observed that, frequently, some of these power plants are producing less than their physical guarantees. In this context, based on the guidelines set by regulators and considering a history of hydro flows presented in the basic design of the power plant, this paper proposes an alternative approach for the calculation of the physical guarantee of these decentralized dispatched power plants, using an harmonic mean estimation.

Keywords: energy regulation, physical guarantee, distributed generation, harmonic mean, assured energy, decentralized dispatch, pch.

## 1. INTRODUÇÃO

A implantação de uma usina hidrelétrica tem início na identificação do aproveitamento ótimo, que é determinado a partir de estudos hidráulicos, econômicos e ambientais, necessários para confirmar a viabilidade do potencial hidrelétrico.

Os fatores associados à produção energética de um aproveitamento ótimo são estimados no projeto básico da usina. Além do projeto básico, esses fatores também são utilizados no cálculo da Garantia Física<sup>1</sup>(GF).

Na fase de outorga dos empreendimentos de grande porte, os aproveitamentos com significativo potencial hidrelétrico são criteriosamente avaliados pelos agentes reguladores e revistos a partir de diversos estudos de viabilidade técnico-econômica e, só depois de aprovados pela Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), são submetidos aos leilões de energia elétrica.

Já os aproveitamentos com pequeno potencial hidrelétrico, igual ou inferior a 3MW, que causam poucos impactos ambientais e tem custo relativamente baixo, não carecem de tantos estudos e não precisam de aprovação da ANEEL.

Entre esses dois conjuntos de empreendimentos existem aqueles de médio porte, com potência entre 3MW e 30MW e área do reservatório com até 13km<sup>2</sup>, que apresentam custos relativamente mais elevados e que necessitam de outorga da ANEEL.

De modo geral, o conjunto formado pelos empreendimentos de pequeno e médio porte faz parte do rol das usinas hidrelétricas não despachadas centralizadamente, convencionadas neste trabalho como usinas distribuídas.

## 2. USINAS DISTRIBUÍDAS

Por definição, as usinas distribuídas são empreendimentos que não têm o despacho operado ou coordenado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e, portanto, estão isentas das influências do despacho centralizado resultante da operação otimizada do Sistema Interligado Nacional (SIN). Ou seja, estas usinas são operadas de forma individual pelos agentes geradores detentores de outorga.

### 2.1 Geração

Segundo os resultados dos estudos apresentados na Nota Técnica nº 516/14, a energia elétrica gerada pelo conjunto das usinas

---

<sup>1</sup> A garantia física de que trata este trabalho é um lastro comercial, outorgado pelo poder concedente, que é utilizando pelos agentes geradores para firmar contratos de fornecimento de energia elétrica.

distribuídas ao longo de um período de 10 anos (2004 a 2013) nunca alcançou o lastro de GF do conjunto. Mesmo em anos com hidrologia bastante favorável, como o ano de 2011, onde a Energia Natural Afluente (ENA) atingiu valores significativamente altos, as usinas distribuídas geraram apenas 92% da GF total do conjunto.

Analisando a revisão de GF das usinas distribuídas (NT nº 9/2015), observa-se que, dos novos montantes de GF das 327 usinas distribuídas alcançadas pela revisão, 66% apresentaram geração média dentro dos requisitos, 33% apresentaram geração média bastante inferior aos limites estabelecidos e somente 1% apresentaram geração média superior a 10% da GF vigente.

## 2.2 Garantia Física

De acordo com a Nota Técnica nº 63/12, muitas vezes, a definição da GF de uma usina distribuída parte de um valor de referência otimista, previsto no projeto básico da usina e que não se confirma posteriormente.

Das variáveis que afetam a GF e as razões que poderiam explicar a diferença entre o valor estimado e o valor efetivo, pode-se destacar as seguintes hipóteses:

- a) As séries de vazões não condizem com o local do aproveitamento;
- b) As máquinas não oferecem o rendimento definido em projeto;
- c) As perdas hidráulicas estão acima das estimadas na fase de projeto;
- d) O consumo interno é superior ao estimado no projeto base;
- e) As perdas elétricas são superiores às estimadas no projeto;
- f) O fator de disponibilidade está abaixo do estimado na fase de projeto;
- g) A metodologia de cálculo da GF superestima o valor outorgado.

Como se observa, todos os itens relacionados, com exceção da metodologia de cálculo da GF, estão associados às expectativas resultantes da execução e implantação do projeto.

Sob a ótica da segurança energética, seria mais adequado partir de valores mais conservadores na etapa de projeto básico e, caso a geração se mostre mais elevada durante a operação da usina, promover as revisões de GF previstas nas normas do Ministério das Minas e Energia (MME), incentivando, assim, ganhos de eficiência energética por parte dos agentes geradores.

Em face das diversas divergências sobre o tema apresentado, o MME instituiu um grupo de trabalho para analisar e propor aprimoramentos à metodologia de cálculo e revisão de GF de usinas hidrelétricas não despachadas centralizadamente pelo ONS (Portaria nº 376/15).

Neste contexto, este trabalho busca contribuir com os agentes geradores e reguladores do setor elétrico, apresentando alternativas ao método atualmente utilizado para estimar os montantes de GF.

### 3. CÁLCULO DA GARANTIA FÍSICA

As usinas distribuídas têm o lastro de GF determinado conforme a metodologia descrita na Portaria nº 463 de 2009 (PRT 463/09).

Nesta portaria se estabelece que a estimativa da garantia física das usinas distribuídas é calculada pela Equação 1:

$$GF_E(i) = \left\{ \sum_{i=1}^n \min[(Q(i) - (q_r + q_u)) * 9,81 * (H_b - h) * \eta_{tg}; P] \right\} * (1 - Perdas_{con}) * (1 - TEIF) * (1 - IP) * \frac{1}{n * 1000} - C_{int} \quad (1)$$

Onde,

$i$  é o  $i$ -ésimo mês do histórico de vazões;

$n$  é o número de meses que compõem o histórico;

$Q(i)$  é a  $i$ -ésima vazão do histórico ( $m^3/s$ );

$q_r$  é a vazão remanescente ( $m^3/s$ );

$q_u$  é a vazão sanitária ( $m^3/s$ );

$H_b$  é a altura de queda bruta nominal (m);

$h$  é a perda hidráulica nominal (m);

$\eta_{tg}$  é o rendimento do conjunto turbina-gerador (%);

$P$  é a potência instalada total (kW);

$Perdas_{con}$  representa as perdas elétricas até o ponto de conexão (%);

$TEIF$  é a taxa efetiva de indisponibilidade forçada (%);

$IP$  é a taxa efetiva de indisponibilidade programada (%);

$C_{int}$  é o consumo interno da unidade geradora ( $\overline{MW}$ );

Analisando a Equação 1, observa-se que o cálculo da GF das usinas distribuídas é realizado a partir da média aritmética das potências geradas por cada valor aleatório de vazão histórica, descontadas as perdas elétricas, as perdas por indisponibilidade (forçada e programada) e o

consumo interno da planta. Onde os valores de referência utilizados, tais como, altura de queda líquida, potência instalada, rendimento do conjunto turbina-gerador, taxa de disponibilidade, perdas elétricas e consumo interno, são parâmetros fixos.

Deste modo, podemos reescrever a Equação 1 no seguinte formato:

$$GF_E(i) = \underbrace{\left\{ \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n P_{ger}(i) \right\}}_{\text{Média Aritmética}} * Descontos - C_{int} \quad (2)$$

onde,  $P_{ger}(i)$  é a  $i$ -ésima potência gerada (MW),  $C_{int}$  é o consumo interno da usina ( $\overline{MW}$ ) e os  $Descontos$  representam as perdas elétricas e as indisponibilidades (%).

#### 4. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo apresentado neste trabalho considerou um conjunto de seis usinas distribuídas A, B, C, D, E e F. Para calcular a garantia física destas usinas foram utilizados os valores de referência apresentados na NT 068/2013 e séries históricas de afluência com 804, 360, 360, 360, 828 e 720 amostras mensais, respectivamente.

Analisando os valores extremos das séries históricas de vazão afluente a partir dos intervalos de confiança obtidos pela inequação de Chebyshev (Gutierrez, 2011), para  $k=2$ , observa-se que, em média, 5% dos valores superiores de cada série estão acima do intervalo e que nenhum dos valores inferiores (abaixo da média) ficou abaixo do intervalo.

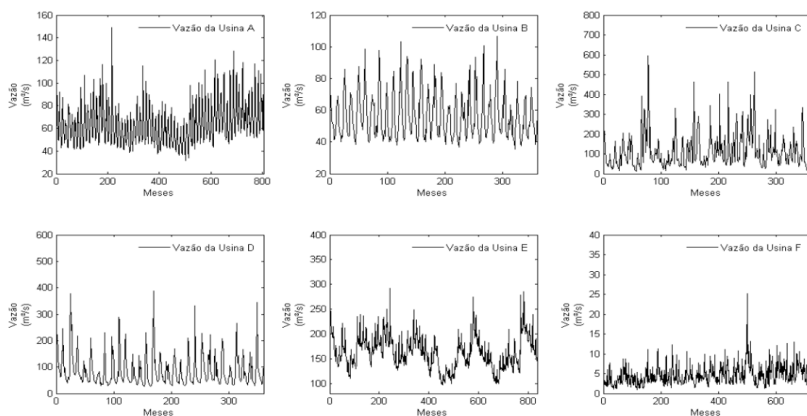


Figura 1 - Séries estocásticas de vazão afluente das usinas A, B, C, D, E e F

De acordo com Huot (1999), a média aritmética pode ser definida como uma medida de tendência central que determina o ponto de equilíbrio de uma série, somente se não existem valores extremos.

Deste modo, a existência de valores extremos nas séries de potências geradas indica que a média aritmética não é a métrica mais adequada para determinar o ponto de equilíbrio da série, pois dá pesos iguais para todas as ocorrências da amostra.

Em contrapartida, os resultados obtidos nos estudos de Rosman (1990), Martinand & Ruhl (1993) e Michael G. Waldon (2004), sugerem que a média harmônica é um bom indicador para determinar a tendência de séries temporais estocásticas, sendo adequada para estimar a tendência de séries com valores atípicos (que podem distorcer a média), como é o caso das séries de potência gerada pelas usinas distribuídas.

Com o intuito de diminuir a amplitude dos valores extremos das amostras, foi realizada uma transformação nas séries de potências estimadas, ponderando cada evento da série pelo número de horas do mês em que a potência foi gerada, então, transformando a série de potências geradas de MW-mês para MWmed-ano.

Em seguida, analisando as séries de potência exibidas na Figura 2, observa-se que as variações das séries de vazão podem influenciar diretamente o comportamento das potências.

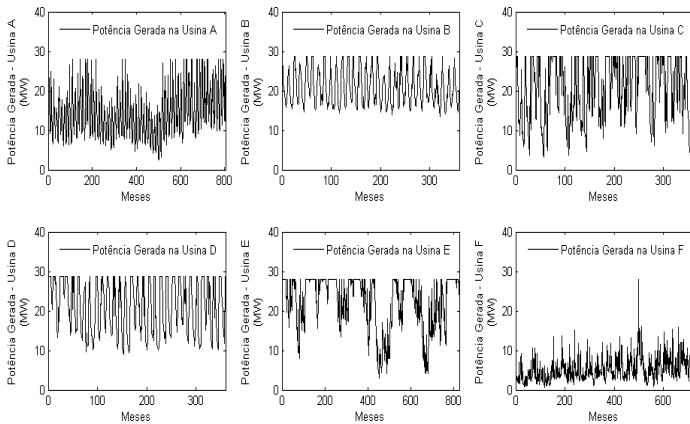


Figura 2 - Potência gerada pelas usinas distribuídas A, B, C, D, E e F

Além disso, pela comparação da Figura 1 com a Figura 2, observa-se que a ocorrência de períodos com geração nominal está relacionada a magnitude das vazões das séries de aflúncias.

## 5. ESTUDO DE CASO

Para avaliar a proposta apresentada, foi realizado um estudo comparativo entre três formas de cálculo da GF: a média aritmética das potências geradas conforme a definição da PRT 463/09 (GF<sub>MA-PRT</sub>), a média aritmética das potências ponderadas (GF<sub>MAP</sub>) e a média harmônica das potências ponderadas (GF<sub>MHP</sub>).

Pela análise das frequências acumuladas é possível determinar a probabilidade de que uma usina gere acima de sua GF, de modo que, quanto maior a frequência acumulada superior à GF, menor será a probabilidade de que a usina gere abaixo da GF outorgada.

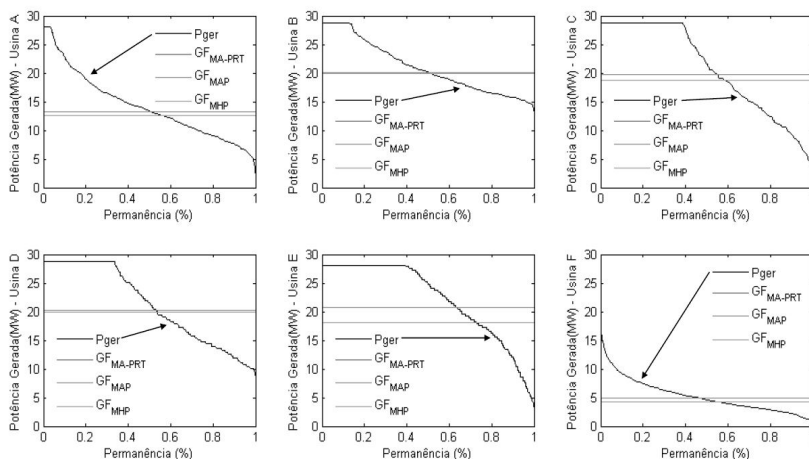


Figure 3 - Potências acumuladas comparadas às garantias físicas estimadas

Cada uma das três linhas horizontais, dos gráficos da Figura 3, representa uma GF distinta, onde, as linhas inferiores indicam maiores frequências acumuladas e menores garantias físicas.

## 6. RESULTADOS

Na Tabela 1 são apresentados os montantes de garantia física estimados a partir dos três métodos investigados.

Tabela 1 - Garantias físicas estimadas com os mesmos parâmetros

Usina	$GF_{MA\_PRT}$ (MWm)	$GF_{MAP}$ (MWm)	$GF_{MHP}$ (MWm)
A	13,23	13,21	12,58
B	20,06	20,03	19,97
C	19,72	19,72	18,72
D	20,24	20,22	19,87
E	20,72	20,71	18,04
F	4,88	4,87	4,28

Pela razão entre as garantias físicas, obtém-se a taxa de variação das GF's avaliadas em relação às GF's estimadas conforme a PRT 463/09.

Tabela 2 - Variação das garantias físicas em relação ao método vigente

Usina	$GF_{MAP} / GF_{MA\_PRT}$ (%)	$GF_{MHP} / GF_{MA\_PRT}$ (%)
A	99,81	95,06
B	99,87	99,56
C	99,98	94,90
D	99,89	98,20
E	99,96	87,09
F	99,83	87,69

Pela comparação das frequências acumuladas das potências estimadas às garantias físicas avaliadas, observa-se que os lastros estimados a partir da média harmônica apresentam frequências acumuladas maiores que os lastros estimados conforme a portaria vigente.

Tabela 3 - Frequência acumulada das potências acima da garantia física

Usina	$GF_{MA\_PRT}$ (%)	$GF_{MAP}$ (%)	$GF_{MHP}$ (%)
A	50,62	62,69	67,16
B	50,83	80,00	80,00
C	55,00	60,00	70,00
D	53,06	66,67	70,00
E	62,92	68,12	76,81
F	47,36	60,00	70,00



## 7. CONCLUSÕES

Este trabalho tratou da avaliação das consequências do emprego de uma abordagem alternativa para o cálculo da garantia física de usinas distribuídas, baseada no uso da média harmônica.

A partir do estudo realizado, observou-se que a existência de valores anômalos nas séries históricas de afluência viabiliza o uso da média harmônica em contraponto a aplicação da média aritmética.

Para minimizar os efeitos destes valores destoantes sobre as estimativas dos montantes de garantia física, foram avaliadas duas propostas: a média aritmética das potências ponderadas ( $GF_{MAP}$ ) e a média harmônica das potências ponderadas ( $GF_{MHP}$ ).

Com a utilização da média harmônica, a probabilidade de potências acima da GF aumentou e o risco de déficit diminuiu.

Deste modo, os indícios apresentados apontam que a média harmônica pode ser um bom estimador para a potência média, pois diminui a exposição dos agentes geradores ao mercado de curto prazo e incentiva o ganho de eficiência das usinas distribuídas.

Um fato que necessita de mais estudos é a observação de que o ganho de confiabilidade não é proporcional à redução de GF, já que, como apresentado, para a usina C, uma redução menor que 5% da GF diminuiu o risco de déficit em até 30%, ao passo que, para a usina F, uma redução de 13% na GF diminuiu o risco de déficit em apenas 20%.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL/MME, Portaria nº 463, de 3 de dezembro de 2009.

BRASIL/MME, Portaria nº 376, de 5 de agosto de 2015

Huot, R. (1999). Métodos Quantitativos para as Ciências Sociais. Lisboa: Instituto Piaget.

GUTIERREZ, S., G. P., Metodologia Probabilística-Possibilística para Tratamento de Incertezas na Estimativa de Tempos em Poços de Petróleo, UNICAMP, São Paulo, 2011.

HUOT, R. (1999). Métodos Quantitativos para as Ciências Sociais. Lisboa: Instituto Piaget.

MARTINAND, G. R., & RUHL, K. J. (1993). Regionalization of harmonic mean streamflows in Kentucky. Water Resources Investigations.

MICHAEL G. WALDON. (2004). Estimation of Average Stream Velocity. Journal of Hydraulic Engineering, 1119–1122.

ROSSMAN, L. A. (1990). Design Stream Flows Based on Harmonic Means. Journal of Hydraulic Engineering.

SRG-SGH/ANEEL, Nota Técnica nº 063/2012.

SRG-SGH/ANEEL, Nota Técnica nº 068/2013.

SGH/SRG/ANEEL, Nota Técnica nº 516, de 19 de setembro de 2014.

SRG/ANEEL, Nota Técnica nº 9, de janeiro de 2015.

