



Análise das Múltiplas Soluções no Cálculo da Energia Firme

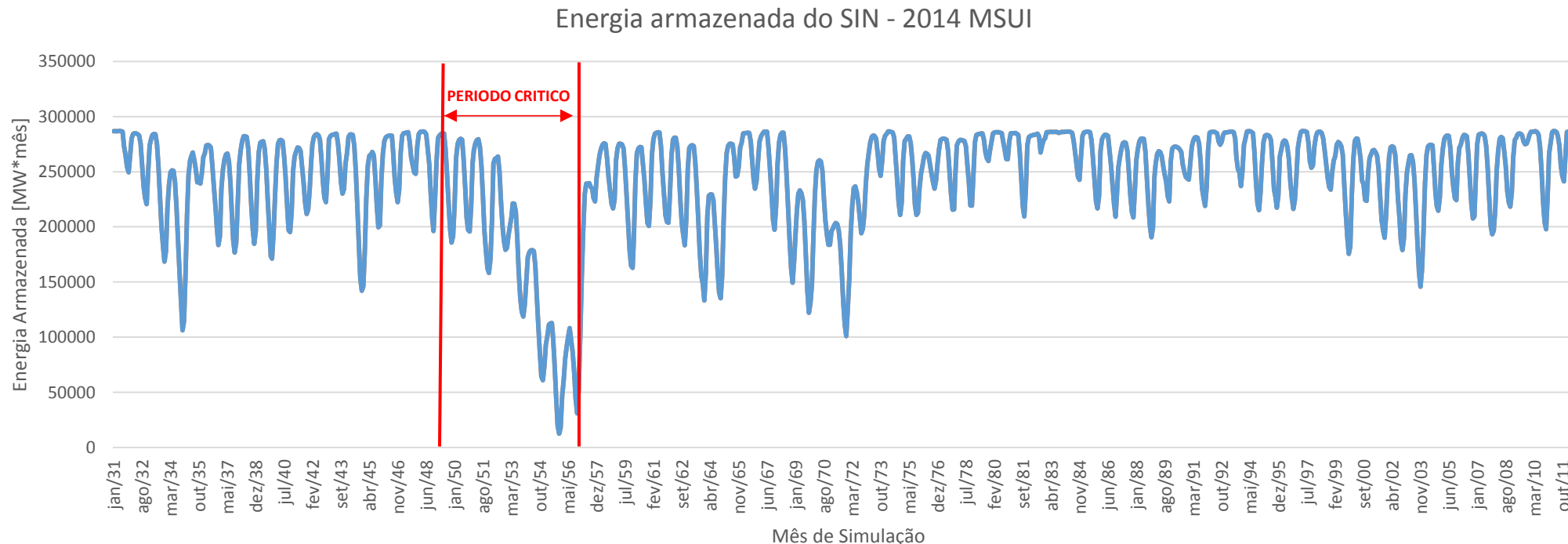
Victor Augusto Durães

Prof. Anderson Rodrigo de Queiroz, Ph.D.



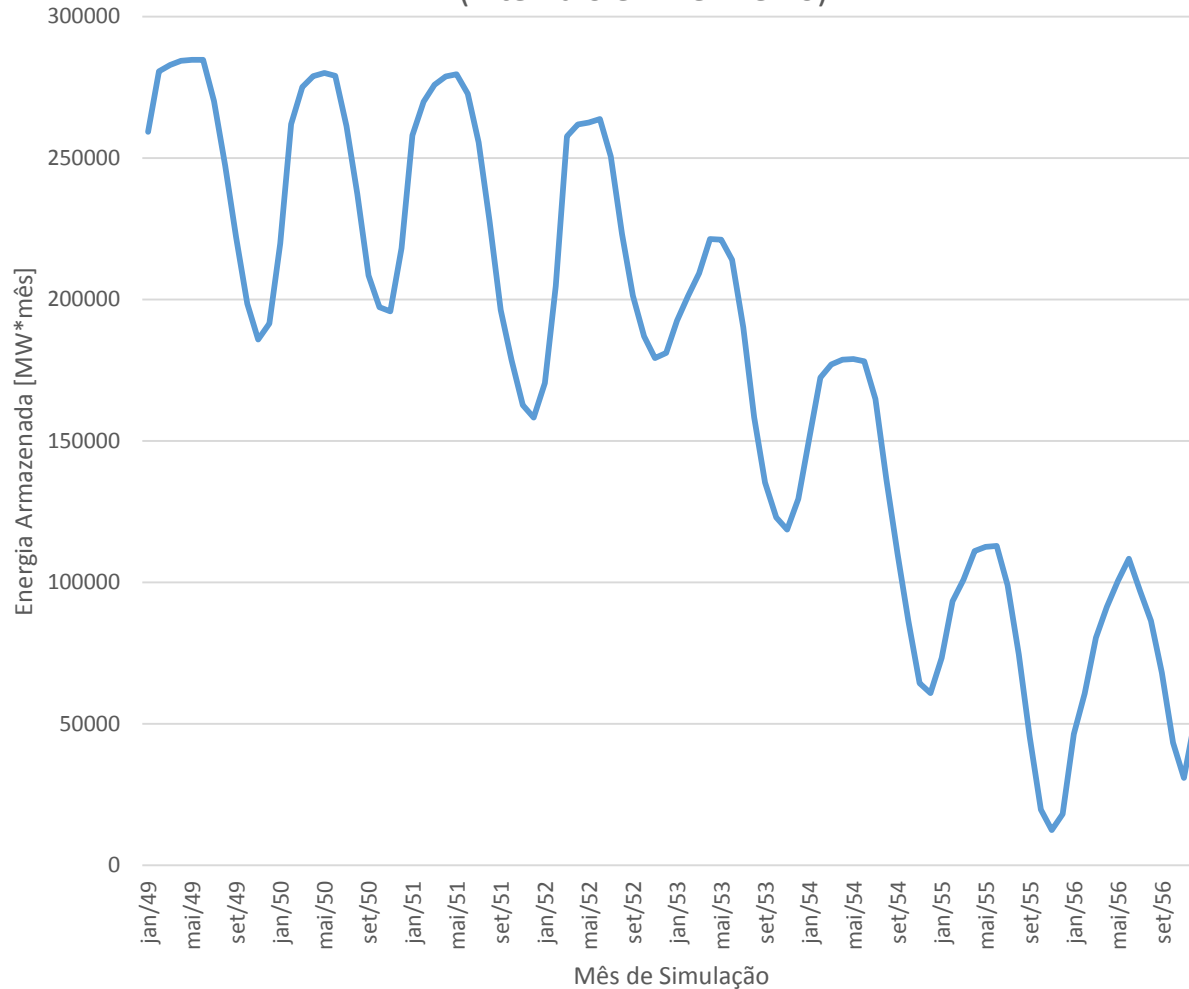
Energia Firme de Usinas Hidrelétricas

No Brasil a Energia Firme é definida como a produção média de energia que uma determinada usina ou sistema tem durante o período crítico (maior intervalo de tempo em que os reservatórios das usinas do sistema, partindo de cheios, e sem reenchimentos totais intermediários, são deplecionados ao máximo, estando o sistema submetido a sua energia firme).



No Brasil o Período Crítico é usualmente encontrado no intervalo de junho de 1949 a novembro de 1956.

Energia armazenada do Sistema
(Intervalo em Vermelho)



O termo Energia Firme pode se referir a duas coisas:

Energia Firme Global- que é a geração média de todas as usinas do sistema durante o Período Crítico.

Energia Firme Individualiza- que é a geração média de apenas uma usina durante o Período Crítico.

Por calcular a Energia Firme do sistema (ou das usinas do sistema) pela geração média no período crítico, a metodologia utilizada pelo Brasil nesses cálculos é chama GMPC (Geração Média no Período Crítico)

Programa Oficial Para o Cálculo da Energia Firme

Devido à complexidade de cálculo de uma solução ótima para operação de sistemas de geração de energia elétrica torna-se necessário a utilização de modelos de simulação para o cálculo de Energia Firme. Entre os modelos utilizados atualmente estão o MSUI e o SUSHI-O, o primeiro desenvolvido pela Eletrobrás e segundo pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica).

O MSUI (Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas) é o modelo utilizado oficialmente para a determinação da Energia Firme Individualizada e Global, sendo o SUSHI-O utilizado mais em estudos energéticos.

O MSUI simula a operação detalhada de um sistema cuja as usinas são todas hidráulicas considerando as características individuais de cada uma delas. O programa tenta maximizar a energia produzida pelo sistema minimizando os vertimentos das usinas e procurando redistribuir a reserva hidráulica disponível de modo a recuperar o nível dos reservatórios de alta prioridade de enchimento. Nesse modelo, os processos para o cálculo da Energia Firme são baseados em heurísticas operativas, e são consideradas as não linearidades inerentes ao problema.

A Importância da Energia Firme

Para entendermos a importância da Energia Firme precisamos entender o que é **Energia Assegurada**.

Do mesmo modo como acontece com o termo Energia Firme o termo Energia Assegurada é definido em duas situações distintas:

Energia Assegurada do Sistema: Montante hipotético de energia que pode ser produzida pelo sistema com um nível de garantia prefixado. Na regulamentação essa garantia é de 95%, o que equivale a dizer que a cada 100 anos hidrológicos simulados apenas em 5 pode haver racionamento de energia. O cálculo dessa Energia é feito utilizando-se o programa NEWAVE (desenvolvido pelo CEPEL) que faz a simulação do SIN **considerando tanto a geração hídrica como a geração térmica**.

Energia Assegurada Individualizada (Garantia Física): Fração da Energia Assegurada do Sistema alocada para uma usina.

A **Energia Assegurada Individualizada** de uma usina hidrelétrica serve como lastro para venda de energia, pois essa corresponde a quantidade máxima de energia e de potência elétrica associadas ao empreendimento que poderão ser utilizados para comprovação de atendimento a carga ou de comercialização por meio de contratos (MME, 2004).

Existe uma relação direta entre a energia Assegurada Individualizada e a Energia Firme Individualizada. Pois para se calcular a Energias Asseguradas Individualizadas primeiro é preciso calcular a Energia Firme Individualizada de todas as usinas do sistema.

Formulação matemática do calculo da Energia Assegurada Individualizada:

$$EAI_i = EH * \frac{EFI_i}{\sum_{k=1}^{nh} EFI_k}$$

Onde:

EAI_i Energia Assegurada Individualizada de uma usina i ;

EH Participação da geração hidráulica na Energia Assegurada do Sistema;

EFI_i **Energia Firme Individualizada da usina i ;**

nh Número de usinas hidrelétricas na configuração.

Formulação do Problema de Cálculo da Energia Firme Através de um Modelo de Programação Linear

$$\text{maximizar } \left(D - P * \sum_{i \in I} y_i^t + B_1 \sum_{i \in I} U_i^t + B_2 * \sum_{i \in I} (V_i^t - \underline{V}_i) * \rho_{iacu}^t \right)$$

SUJEITO A:

$$V_i^{t+1} = V_i^t - Q_i^t - S_i^t + A_i^t + \sum_{m \in M_i} (Q_m^t + S_m^t) - e_i^t + y_i^t - y_i^{t-1}$$

$$D = \sum_{i=1}^{NP} PG_i^t$$

$$0 \leq S_i^t + Q_i^t - U_i^t * \underline{V}_i \leq \infty$$

$$0 \leq Q_i^t \leq \overline{Q}_i$$

$$0 \leq S_i^t \leq \infty$$

$$\underline{V}_i \leq V_i^t \leq \overline{V}_i$$

$$D \geq 0$$

$$y_i^t \geq 0$$

$$0 \leq U_i^t \leq 1$$

Equação de Balanceamento Hídrico

$$V_i^{t+1} = V_i^t - Q_i^t - S_i^t + A_i^t + \sum_{m \in M_i} (Q_m^t + S_m^t) - e_i^t + y_i^t - y_i^{t-1}$$

V_i^t - Volume de Armazenamento de água da usina i no estágio t

Q_i^t - Volume de água turbinado da usina i no estágio t

S_i^t - Volume de água vertido pela usina i no estágio t

A_i^t - Vazão incremental do rio que abastece a usina i no estágio t

e_i^t - Evaporação de água da usina i no estágio t

y_i^t - Variável de folga

Vazão Mínima

$$0 \leq S_i^t + Q_i^t - U_i^t * \underline{Vazao}_i \leq \infty$$

$$0 \leq U_i^t \leq 1$$

U_i^t - Variável auxiliar para a determinação da vazão mínima.

→ Através dessas equações e da função objetivo conseguimos definir uma vazão mínima que a usina deve respeitar, no entanto nem sempre é possível atender essa vazão, desse modo o programa opera tentando garantir que sempre as usinas vão estar turbinando e vertendo o equivalente a vazão mínima, quando possível, e quando isso não é possível o programa obriga a usina a ter uma vazão o mais próximo da vazão mínima.

Aproximações Lineares

$$PG_i^t = \rho_{eq}^i * Q_i^t$$

$$\rho_{eq}^i = \rho_{sp}^i * h_{eq}^i$$

$$h_{eq}^i = \frac{\int_{V_{i, \text{mtn}}}^{V_{i, \text{max}}} \phi_i^{(1)} dV_i}{\bar{V}_i - \underline{V}_i} - \bar{\theta}_i - H_{loss_i}$$

$$\phi_i^{(1)} = \sum_{k=1}^5 (CR_{k,i}^{(1)} * (V_i)^{k-1})$$

$$e_i^t = \text{Área}_{i,eq} * C_{i,evp}^t * 10^{-3}$$

$$\text{Área}_{i,eq} = \phi_i^{(2)} (h_{eq}^i + \bar{\theta}_i)$$

PG_i^t - Potência gerada na usina i , no estágio t

ρ_{eq}^i - Produtibilidade equivalente da usina i

ρ_{sp}^i - Produtibilidade específica da usina i

h_{eq}^i - Altura de queda equivalente da usina i

$\bar{\theta}_i$ - Cota média do canal de fuga da usina i

H_{loss_i} - Perda hidráulica na usina i devido da passagem de água pela tubulação.

$\phi_i^{(1)}$ - Polinômio Cota-Volume da usina i

$\phi_i^{(2)}$ - Polinômio Cota-Área da usina i

Função Objetivo

$$\text{maximizar} \left(\underset{\text{I}}{D} - \underset{\text{II}}{P} * \sum_{i \in I} y_i^t + \underset{\text{III}}{B_1} \sum_{i \in I} U_i^t + \underset{\text{IV}}{B_2} * \sum_{i \in I} (V_i^t - \underline{V}_i) * \rho_{i_{acu}}^t \right)$$

I- $D = \sum_{i=1}^{NP} PG_i^t$ - Energia Firme do Sistema (constante em todos os meses do histórico hidrológico utilizado)

II- $P * \sum_{i \in I} y_i^t$

P : Penalidade associada a ativação da variável de folga ($P = 10^6$)

III- $B_1 * \sum_{i \in I} U_i^t$

B_1 : Benefício associado ao cumprimento da restrição de vazão mínima ($B_1 = 20000$)

IV- $B_2 * \sum_{i \in I} (V_i^t - \underline{V}_i) * \rho_{i_{acu}}^t$

B_2 : Benefício associado a tendência de armazenamento de energia nos reservatórios ($B_2 = 0.00001$)

$$\rho_{i_{acu}}^t = \sum_{j \in J_i} \rho_j$$

ρ_j - Produtibilidade equivalente da j ésima usina a jusante da usina i

Análise do Modelo Utilizado Atualmente no Cálculo da Energia Firme

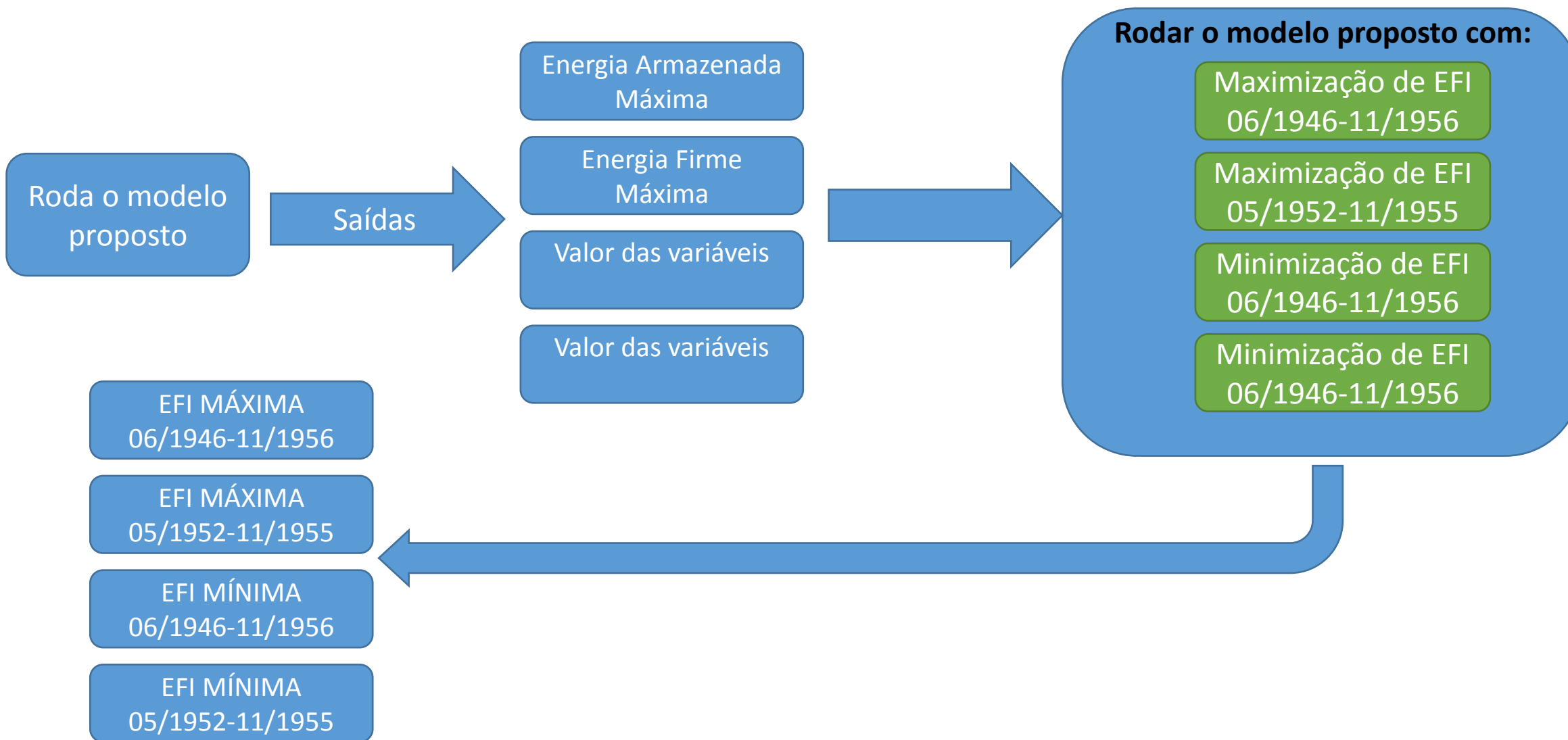
***O método de alocação GMPC não garante satisfazer um rateio justo na ótica de um jogo cooperativo (Faria, 2004).**

***Utilização um único período crítico para o SIN:** Atualmente no cálculo da Energia Firme utiliza-se um único período crítico para todo SIN quando, devido a diversidade hidrológica, existem distintos períodos críticos em cada subsistema. Como resultado, o critério de rateio pelo período crítico privilegia usinas cujas vazões durante o período de 1949 a 1956 foram elevadas, como é o caso das hidrelétricas localizadas na região Sul (GCR, 2013).

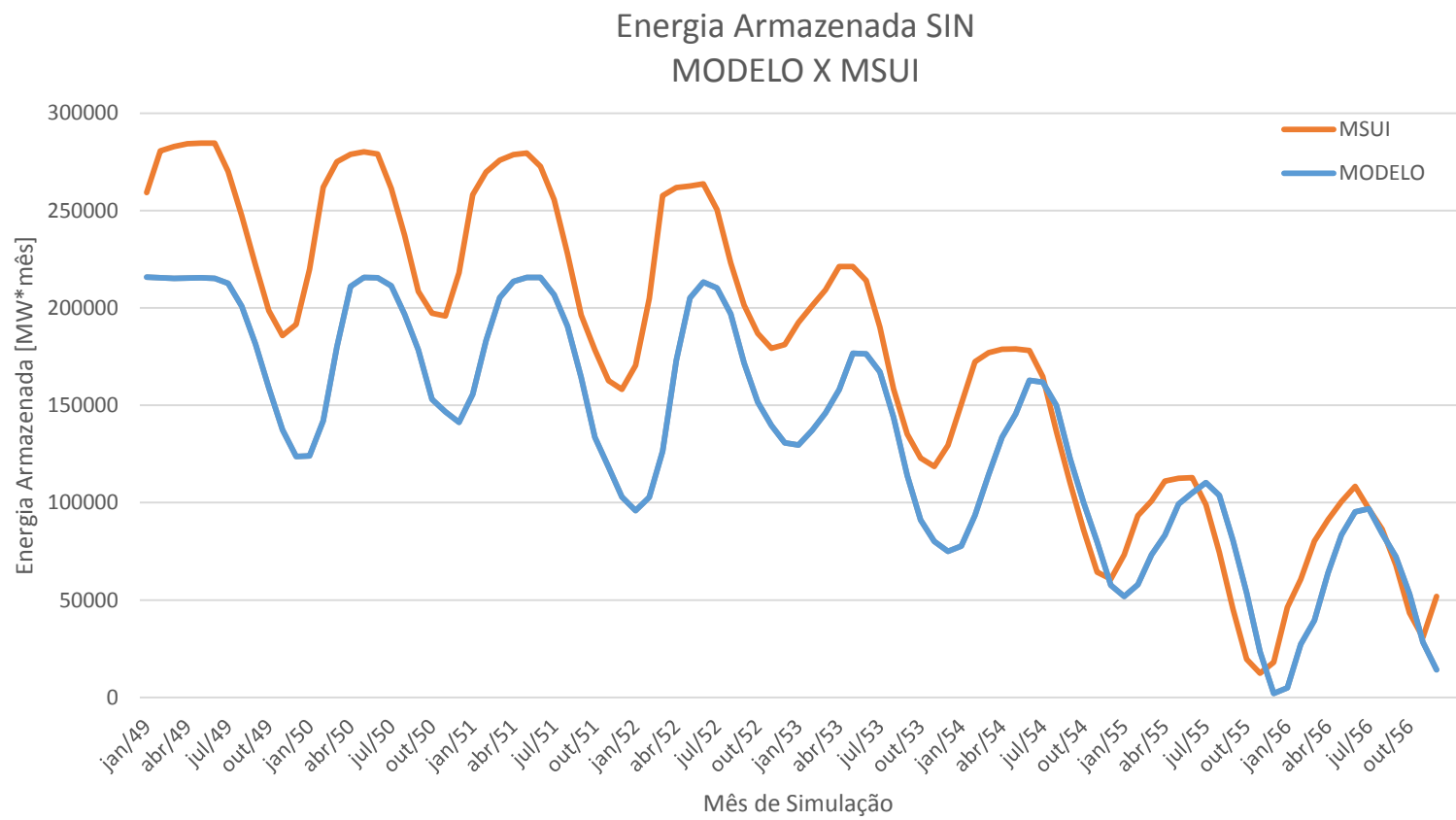
***Valorização econômica do benefício de regularização a montante:** O critério de repartição da Energia Assegurada do sistema é em proporção as suas energias firmes individualizadas, esse método, porém, não sinaliza corretamente o benefício que o reservatório traz para a regularização das afluições às usinas a jusante (GCR, 2013).

***Múltiplas soluções no cálculo da Energia Firme?**

Modelo Adotado para a Análise das Múltiplas Soluções no Cálculo da Energia Firme



Apresentação dos Dados dos Modelos Propostos

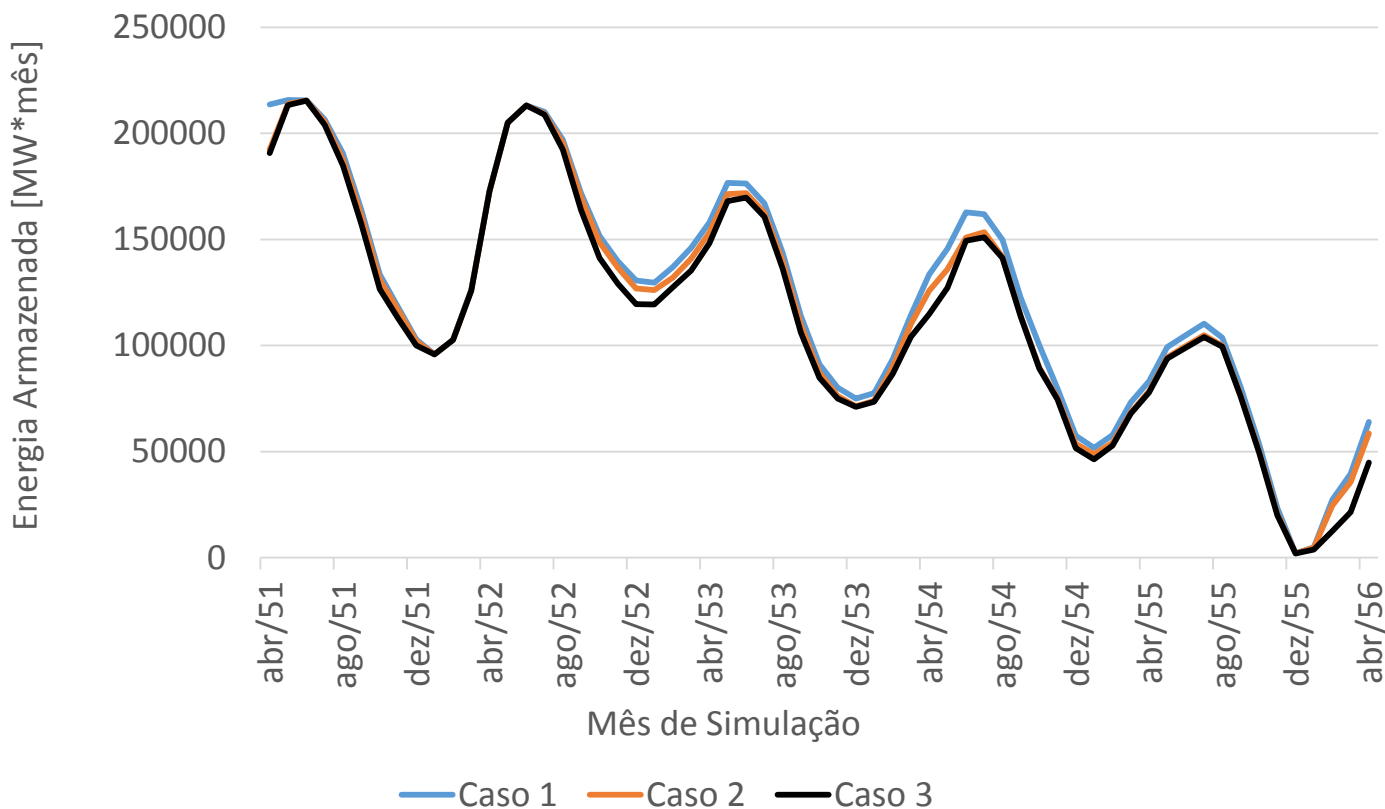


Para o caso simulado o período crítico utilizado pelo MSUI foi de 06/1949 a 11/1956 (apesar desse não coincidir com o período crítico real do sistema 05/1951 a 11/1955), o período crítico encontrado na simulação através do modelo proposto foi de 05/1952 a 11/1955.

Notamos que as curvas apresentam semelhança quanto ao comportamento estando a diferença mais marcante na amplitude das energias armazenadas (diferença essa decorrente da linearização feita).

Energia Armazenada do Sistema Variando B2

Energia Armazenada para Diferentes Valores de B2

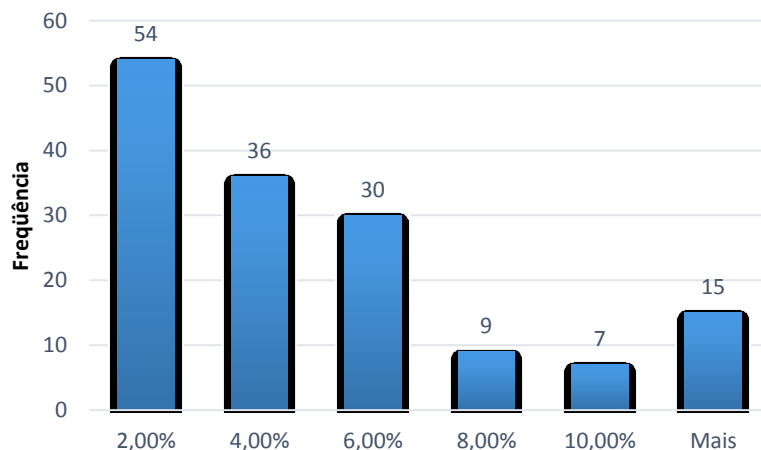


Diferença no somatório da energia armazenada do sistema por subsistemas variando B2				
	S	SE/CO	N	NE
Caso 1	13,90%	58,68%	5,05%	22,37%
Caso 2	11,85%	61,87%	5,06%	21,22%
Caso 3	11,23%	62,38%	4,84%	21,55%

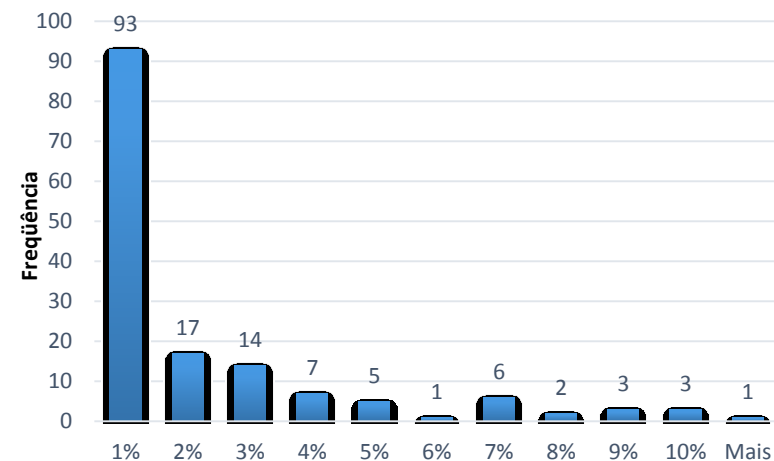
Caso 1 =0.00001; Caso 2 =0; Caso 3 =-0.00001

Diferença percentual MSUI x Modelo PC 06/1949 – 11/1956

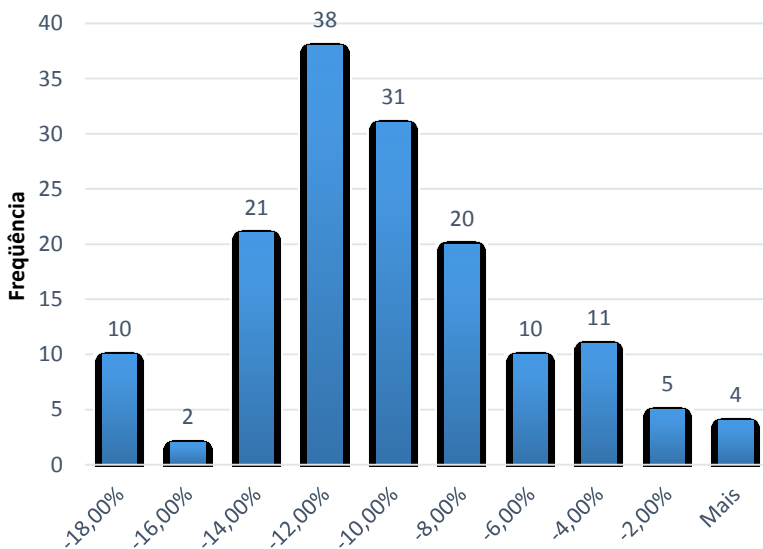
EFG [MW]- MUSI X MODELO		
EFG MSUI	EFG MODELO	DIF
54776,23	55051,02	0,502%



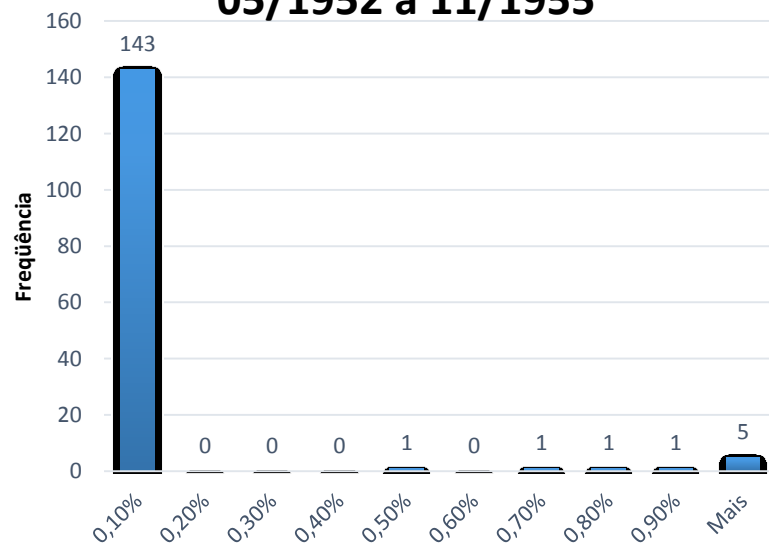
EF Máxima Modelo X Modelo_max 06/1949 a 11/1956



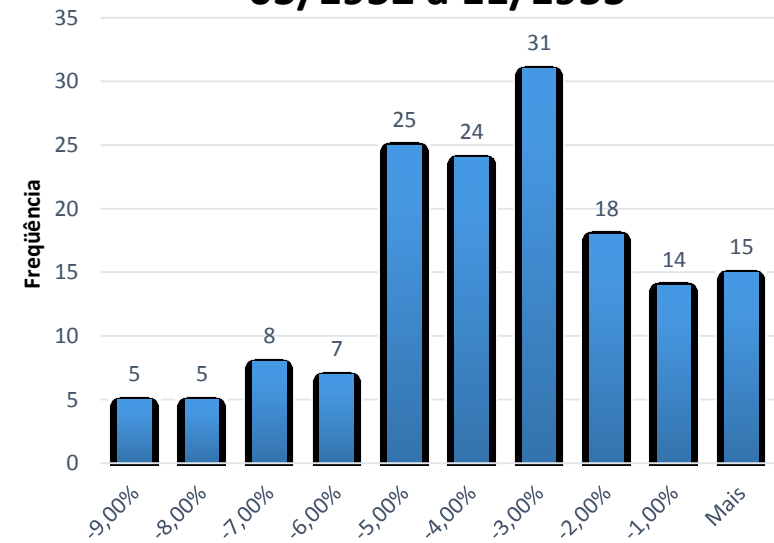
EF Mínima Modelo X Modelo_min 06/1949 a 11/1956



EF Máximo Modelo X Modelo_max 05/1952 a 11/1955



EF Mínima Modelo X Modelo_min 05/1952 a 11/1955



Referências:

- *Operador Nacional do Sistema-ONS. **Glossário de Termos Técnicos**. Agosto, 2009;
- *Comissão de Análise do Sistema Hidrotérmico de Energia Elétrica. **Relatório da Comissão de Análise do Sistema Hidrotérmico de Energia Elétrica**. Julho 2001.
- *Ministério de Minas e Energia – MME. **Define, nos termos do § 2º do art. 2º e do § 1º do art. 4º do Decreto nº 5.163, de 2004, conforme critérios gerais de garantia de suprimento, os montantes da garantia física dos empreendimentos de geração elétrica**. Novembro 2004. Disponível em:< <http://www.mme.gov.br> >. Acesso em: 08/06/2014.
- *Grupo de Estudos de Comercialização, Econômica e Regularização de Energia Elétrica –GCR. **Alocação de Garantia Física de Usinas Geradoras Através do Método do Benefício Marginal: Valorização Econômica do Benefício de Regularização a Montante**. XXII SNPTEE, Brasília, Outubro 2013.
- *Ministério de Minas e Energia - MME. **Portaria Nº 258, de 28 de Julho de 2008**. Julho 2008.
- *Faria, E.T. **Aplicação de Teoria dos Jogos à Repartição da Energia Firme de um Sistema Hidrelétrico**. PUC-Rio. 2004.
- *Yagi Moromisato, German David. **Programação dinâmica aplicada ao cálculo da energia firme de usinas hidrelétricas**. Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF – Juiz de Fora. 2012.