

# Ponderação de Critérios de Otimização Utilizados em Fluxo de Potência Ótimo Dinâmico que Realiza Despacho de Geração Hidrotérmico Mensal Discretizado por Patamares de Carga

Felipe José Lachovicz\* Thelma S. Piazza Fernandes\*\*

Marcelo R. Bessa\*\*\* Klaus de Geus\*\*\*\*

\*Lactec, Segmento de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação/Sistemas Elétricos, Curitiba, PR, Brasil (Tel: (41) 3361-6205; e-mail: felipe.lachovicz@lactec.org.br).

\*\*Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Elétrica, Curitiba, PR, Brasil (e-mail: thelma@eletrica.ufpr.br)

\*\*\* Universidade Federal do Paraná, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Curitiba, PR, Brasil (e-mail: marcelorbessa@gmail.com)

\*\*\*\* Copel Geração e Transmissão S. A., Curitiba, PR, Brasil (e-mail: klaus@copel.com )

---

**Abstract:** This work describes a methodology for weighting optimization criteria that compose a Dynamic Optimal Power Flow (DOPF) that calculates monthly hydrothermal dispatch discretized by load levels. This DOPF is also used in a formulation that determines non-linear medium-term hydrothermal dispatch with stochastic modeling and that adopts detailed representation of all hydroelectric and thermoelectric plants and includes electrical constraints of the Brazilian interconnected system. The optimization criteria considered in the DOPF are: minimization of the cost of generating the thermal plants, cost of deficit, electrical losses, and minimization of power flow in the exchange lines and the deviation of thermal power in relation to that provided by the energy problem. The concomitant consideration of these optimization criteria requires analysis as to the search for the best combination of weights associated with each portion of the objective function. The applied methodology uses effort versus impact matrix to help obtain the best combination of weights that meet pre-established criteria, as well as normalize results of each plot in order to better characterize the performance of each of them in the solution of the problem. The use of this methodology is part of an ANEEL R&D project, which provides for large-scale optimization applied to the Brazilian hydrothermal dispatch. The weighting process described was tested for the PAR-ONS case for the year 2017 (winter), which has 6352 bars and 9269 lines for each load level.

**Resumo:** Este trabalho descreve uma metodologia aplicada para ponderação de critérios de otimização que compõem um Fluxo de Potência Ótimo Dinâmico (FPOD) que determina despacho hidrotérmico mensal discretizado por patamares de carga. Esse FPOD é utilizado em formulação que determina despacho hidrotérmico de médio prazo não linear, com modelagem estocástica e que adota representação detalhada de todas as usinas hidroelétricas e termoelétricas e inclui restrições elétricas do sistema interligado brasileiro. Os critérios de otimização considerados no FPOD são os seguintes: minimização do custo de geração das usinas térmicas, do custo de déficit, das perdas elétricas, minimização de fluxo de potência nas linhas de intercâmbio e do desvio de potência térmica em relação ao fornecido pelo problema energético. A consideração concomitante desses critérios de otimização requer análises quanto a busca da melhor combinação dos pesos associados a cada parcela da função objetivo. A metodologia aplicada utiliza matriz de esforço versus impacto para auxiliar na obtenção da melhor combinação de pesos que atendem critérios pré-estabelecidos, como também normaliza resultados de cada parcela a fim de melhor caracterizar a atuação de cada uma delas na solução do problema. A utilização dessa metodologia faz parte de um projeto de P&D ANEEL, proposto pela COPEL, PD-6491-0307/2013, que prevê otimização em larga escala aplicada ao despacho hidrotérmico brasileiro. O processo de ponderação descrito foi testado para o caso PAR-ONS referente ao ano de 2017 (inverno) que possui 6352 barras e 9269 linhas para cada patamar de carga.

---

**Keywords:** Dynamic optimal power flow; hydrothermal dispatch; medium-term planning; weighing criteria; effort versus impact matrix.

---

**Palavras-chaves:** Fluxo de potência ótimo dinâmico; despacho hidrotérmico; planejamento de médio prazo; ponderação de critérios; matriz esforço versus impacto.

---

## 1. INTRODUÇÃO

O objetivo do planejamento e operação do sistema elétrico é a determinação de ponto de operação mais econômico obtido pela minimização dos custos de geração de energia elétrica que garante o atendimento à demanda e minimização de custos de *déficit*.

Para tanto, além do modelo oficialmente usado pelo operador brasileiro para resolver o problema de despacho hidrotérmico, tal como o NEWAVE (CEPEL, 2016), existem outros métodos de otimização, aplicados ao problema de planejamento de médio prazo, tais como: (Takigawa et al. 1990) que emprega as técnicas de Lagrangeano Aumentado e Relaxação Lagrangeana; (Leite et al. 2002) e (Kumar e Mohan 2011) que utilizam técnicas de Inteligência Artificial; (Sifuentes e Vargas 2007) que utiliza a técnica de decomposição de Benders; (Ramos et al. 2011) que usa Otimização Não-Linear pelo Método dos Pontos Interiores conjuntamente com Algoritmos Genéticos para resolver a parte térmica e hidráulica separadamente, entre outros mais.

Pode-se citar ainda, (Marcilio, 2014) e (Andriolo et al. 2015) que representam os reservatórios individualizados e modelam o problema de otimização não linear, multiobjetivo, com consideração detalhada das equações regentes e das restrições de transmissão entre os subsistemas elétricos já no horizonte do planejamento de médio prazo, de modo a se analisar quantitativamente o efeito das restrições elétricas sobre o problema energético, apresentando resultados importantes sobre a influência da representação da rede elétrica nos resultados finais.

Em (Marcilio, 2014) e (Andriolo et al. 2015), a verificação das restrições elétricas é feita através de um Fluxo de Potência Ótimo Dinâmico (FPOD) que realiza um despacho hidrotérmico mensal por patamares (pesada, média e leve), com o objetivo de averiguar se as restrições de transmissão das linhas de intercâmbio entre os subsistemas e o atendimento à demanda são satisfeitas.

Um FPOD pode ser modelado como um problema multiobjetivo, sendo necessária uma avaliação adequada das parcelas que representam cada um desses objetivos. Um tratamento possível é a definição de pesos que ponderem os diferentes critérios de otimização de maneira a priorizar aqueles mais importantes para o estudo. Outra abordagem possível é a aplicação de processos de normalização desses critérios. A escolha dos pesos, quando utilizados, é um tabu na execução de estudos de otimização, pois abre espaço para questionamentos a respeito dos valores escolhidos, uma vez que essa escolha é feita geralmente de forma empírica conforme a sensibilidade do operador ou dos objetivos do estudo (Szuovoviviski 2008).

Com intuito de nortear o processo da escolha dos valores dos pesos, este artigo tem por objetivo aplicar a metodologia da matriz esforço x impacto (Jorn 2010).

Essa metodologia consiste na plotagem de um gráfico de dispersão no qual o eixo das ordenadas representa o impacto do resultado e o eixo das abscissas representa o esforço do

resultado. Assim, a escolha dos pesos deve ser orientada para os que apresentem um alto impacto nos resultados com um baixo esforço aplicado.

Essa metodologia será aplicada neste artigo para a ponderação dos critérios de otimização de um despacho hidrotérmico aplicado ao horizonte de médio prazo, cujas restrições elétricas são resolvidas via FPOD linear e cujo modelo adota a representação detalhada de todas as usinas hidroelétricas e termoelétricas do Sistema Interligado Brasileiro (SIN).

A modelagem está sendo aprimorada no projeto de P&D ANEEL, proposto pela COPEL, PD-6491-0307/2013, cujo título é “Otimização em larga escala aplicada ao despacho hidrotérmico brasileiro: modelos hierárquicos de planejamento de operação e planejamento em médio e curto prazos com integração de energia e potência”. Sua solução está dividida em etapas: geração de séries sintéticas; otimização estocástica implícita dos problemas energético de despacho hidrotérmico resolvidos para séries sintéticas geradas e verificação das restrições elétricas do problema.

Para a verificação das restrições elétricas, é utilizado um FPOD linear que realiza um despacho hidrotérmico mensal por patamares (pesada, média e leve), com o objetivo de averiguar se as restrições de transmissão das linhas de intercâmbio entre os subsistemas e o atendimento à demanda são satisfeitas.

Para se executar o FPOD, é necessária uma série de dados de entrada: dados dos parâmetros das linhas, a capacidade delas, identificação das linhas de intercâmbio entre subsistemas, informação das cargas para cada patamar, identificação das barras com usinas hidráulicas e térmicas despacháveis pelo ONS, limites de geração máxima e mínima dessas usinas. Parte dessas informações é obtida do PAR-ONS cujos dados, que estão formatados para serem executados pelo ANAREDE (CEPEL 2010), devem ser adaptados para que possam ser utilizados na execução de FPOD, conforme descrito em (Resende et al. 2018).

O objetivo deste artigo é, então, aplicar a metodologia que utiliza matriz de esforço versus impacto (Jorn 2010), para auxiliar na obtenção da melhor combinação de pesos que atendem critérios de otimização de FPOD utilizado para monitorar restrições elétricas de planejamento hidrotérmico, como também normalizar resultados de cada parcela a fim de melhor caracterizar a atuação de cada uma delas na solução do problema.

Os critérios de otimização considerados no FPOD são: minimização do custo de geração das usinas térmicas, do custo de déficit, das perdas elétricas, minimização de fluxo de potência nas linhas de intercâmbio e do desvio de potência térmica em relação ao fornecido pelo problema energético, tal como descrito em (Marcilio, 2014).

A disposição deste artigo é a seguinte: inicialmente é descrita a formulação matemática básica do FPOD. Na sequência, apresentam-se a caracterização de cada critério de otimização, como também se descreve e se aplica o método da matriz-esforço versus impacto à rede elétrica do SIN, obtido do PAR-ONS referente o ano de 2017 (inverno). E, finalmente, apresentam-se algumas conclusões.

## 2. FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO DINÂMICO

O Fluxo de Potência Ótimo Dinâmico (FPOD) formulado neste trabalho, realiza despacho de potência ativa de sistemas hidrotérmicos para horizonte de um mês, o qual é discretizado em três patamares de carga (pesada, média e leve).

Ele tem como premissa determinar estratégia de geração hidráulica e térmica ( $P_{gh}$  e  $P_{gt}$ , respectivamente) para cada patamar de carga de modo a minimizar custos operativos e de modo a atender as metas energéticas das usinas hidráulicas, obtidas de estudos energéticos prévios.

Ele possui os seguintes critérios de otimização: minimização de custo das térmicas (ponderado pelo peso  $w_c$ ), minimização de custo de déficit (ponderado pelo peso  $w_{fic}$ ); minimização de perdas (ponderado pelo peso  $w_p$ ), e minimização dos desvios de potência térmica entre despachos obtidos via programação energética e elétrica (ponderado pelo peso  $w_{term}$ ). Além disso, a fim de se evitar fluxos circulantes entre os subsistemas, propõe-se uma função objetivo que maximiza as variáveis de folga das restrições dos limites de intercâmbio como forma de minimizar o tráfego de fluxo através das linhas perto dos seus limites máximos (esse critério é habilitado pelo peso  $w_{fluxo}$ ). Ao se maximizar as variáveis de folga, se está aumentando a distância entre o valor do fluxo que circula pelas linhas e o seu limite máximo de transmissão.

Os pesos  $w_c$ ,  $w_{fic}$ ,  $w_p$ ,  $w_{term}$  e  $w_{fluxo}$  habilitam ou não os critérios citados e também os ponderam conforme interesse do planejador.

Ainda são feitas as seguintes considerações:

- Monitoramento de fluxo das linhas de intercâmbio ( $Fl$ ) entre subsistemas;
- Consideração de geração térmica ( $P_t$ ) constante ao longo dos patamares;
- Inclusão e geradores fictícios ( $P_{g_{fic}}$ ) com alto custo em todas as usinas hidráulicas ( $P_{gh}$ ) a fim de se simular déficit de geração;
- Modelagem linear das equações de balanço de potência;

Uso como Base de Dados para simulação O Plano de Ampliação e Reforços (PAR) do ONS que representa toda a rede elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN) ao longo de três patamares.

A seguir, descreve-se a formulação do FPOD tal como proposta em Andriolo et al (2015) e Borges et al (2011).

### 2.1 Parâmetros de Entrada e saída

O vetor **Meta**, com dimensão ( $nb \times 1$ ), contém as metas energéticas das usinas hidráulicas, as quais são fornecidas por estudos energéticos prévios. Cada elemento  $Meta_i$  representa a meta energética para a usina hidráulica localizada na barra  $i$ , para o período mensal considerado.

A carga correspondente a três patamares de carga (pesada, média e leve) é representada pelo vetor **Pd** (demanda de

potência ativa) com dimensão  $[(nb \cdot npat) \times 1]$  sendo  $nb$  o número de barras e  $npat$  o número de patamares. Cada elemento  $Pd_i^k$  de **Pd** representa a demanda de potência ativa na barra  $i$  no patamar  $k$ , com  $i=1, \dots, nb$  e  $k=1, \dots, npat$ .

Os limites máximos e mínimos de geração de potência ativa dos geradores térmicos e hidráulicos são:

$$\mathbf{Ptermax} = [Ptermax_1 \quad \dots \quad Ptermax_{nb}]^t \quad (1)$$

onde  $Ptermax_i$  representa o limite de potência ativa máximo de uma usina térmica localizada na barra  $i$ ;

$$\mathbf{Phidmax} = [Phidmax_1 \quad \dots \quad Phidmax_{nb}]^t \quad (2)$$

onde  $Phidmax_i$  representa o limite de potência ativa máximo de uma usina hidráulica localizada na barra  $i$ ;

Dependendo do número de patamares considerado, esses vetores se repetem sequencialmente formando vetores com dimensão  $[(nb \cdot npat) \times 1]$ :

$$\mathbf{Ptmax} = [\mathbf{Ptermax} \quad \dots \quad \mathbf{Ptermax}]^t \quad (3)$$

$$\mathbf{Phmax} = [\mathbf{Phidmax} \quad \dots \quad \mathbf{Phidmax}]^t \quad (4)$$

Semelhantemente, tem-se **Ptmin**, **Phmin** que são limites mínimos de geração de potência ativa para térmicas.

A seguir, são descritas as variáveis de otimização envolvidas no FPOD tais como descrito em Andriolo et al (2015) e Borges et al (2011).

A potência ativa gerada pelas usinas hidrelétricas, **Pgh**, com dimensão  $[(nb \cdot npat) \times 1]$  é composto por elementos,  $Ph_i^k$  que representam a geração de potência ativa na barra  $i$  e patamar  $k$ , com  $i=1, \dots, nb$  e  $k=1, \dots, npat$ .

Tipicamente (Borges et al 2011), considera-se que a potência ativa das usinas térmicas é constante para todos os patamares. Assim, o vetor **Pt** (geração ativa térmica) é repetido  $npat$  vezes:

$$\mathbf{Pgt} = [Pt_1 \quad \dots \quad Pt_{nb} \quad \dots \quad Pt_1 \quad \dots \quad Pt_{nb}]^t \quad (5)$$

onde  $Pt_i$  é a geração de potência ativa da usina térmica localizada na barra  $i$ .

Como comentado nas considerações, outra variável de otimização se refere à inclusão de geradores fictícios ( $P_{g_{fic}}$ ) com alto custo em todas as usinas hidráulicas ( $P_{gh}$ ) a fim de se simular déficit de geração. Esse vetor **Pg<sub>fic</sub>**, com dimensão  $[(nb \cdot npat) \times 1]$ , é composto por elementos  $Pg_{fic}_i^k$  que representam geração de potência fictícia na barra  $i$  no patamar  $k$ , com  $i=1, \dots, nb$  e  $k=1, \dots, npat$ .

A potência ativa total gerada ( $P_g$ ) é a soma vetorial da geração de potência ativa das usinas hidráulica e térmica e fictícia:

$$\mathbf{Pg} = \mathbf{Pgh} + \mathbf{Pgt} + \mathbf{Pg_{fic}} \quad (6)$$

Como essa formulação se baseia nas equações lineares de balanços de potência, as quais consideram perfil plano de tensão em todas as barras, apenas os ângulos das barras são otimizados, os quais estão contidos no vetor  $\theta$  com dimensão  $[(nb.npat) \times 1]$  cujos elementos são  $\theta_i^k$  que representam o ângulo de tensão na barra  $i$  e patamar  $k$ .

Deve-se lembrar que, por questões de singularidade, os ângulos da barra de referências para cada patamar são considerados nulos e retirados do vetor  $\theta$ .

## 2.2 Restrições de Igualdade e desigualdades

As restrições de igualdades são as equações de balanço de potência ativa lineares:

$$\mathbf{Pg} - \mathbf{Pd} = \mathbf{BB} \cdot \theta \quad (7)$$

onde  $\mathbf{BB}$  é formada pelas matrizes  $\mathbf{B}$  dispostas diagonalmente com dimensão  $[nb.np \times nb.np]$ . A matriz  $\mathbf{B}$  representa a matriz do tipo susceptância cuja coluna referente à barra de referência é retirada (Borges et al 2011).

Os limites operacionais dos geradores são:

$$\mathbf{P}_{\min} \leq \mathbf{P}_{gh} + \mathbf{P}_{gfc} \leq \mathbf{P}_{\max} \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_{t\min} \leq \mathbf{P}_{gt} \leq \mathbf{P}_{t\max} \quad (9)$$

Para se evitar que se gerem valores negativos de geração fictícia, são introduzidas restrições de não negatividade:

$$\mathbf{0} \leq \mathbf{P}_{gfc} \quad (10)$$

Como o despacho das geradoras hidráulicas deve satisfazer os valores de metas energéticas ( $Meta_i$ ) para cada usina hidráulica  $i$ , tem-se:

$$\sum_{k=1}^{np} Pgh_i^k \leq Meta_i \quad i=1, \dots, ngh \quad (11)$$

onde  $ngh$  é o número de geradores hidráulicos.

Finalmente, a última restrição operacional é quanto aos limites de fluxo nas linhas, expressa como:

$$-\mathbf{F}_{\max} \leq \mathbf{M}_{FL} \cdot \mathbf{P}^k \leq \mathbf{F}_{\max} \quad k=1, \dots, npat \quad (12)$$

onde  $\mathbf{F}_{\max}$  contém limites de fluxos de potência ativa circulantes pelas linhas de transmissão,  $\mathbf{M}_{FL}$  é uma matriz que auxilia o cálculo do fluxo linearizado nas linhas para cada patamar  $k$ ,  $\mathbf{P}^k$  é o vetor de injeção de potência no período  $k$ .

## 2.3 Critérios de Otimização

A função objetivo considera várias parcelas tais como:

- minimização do custo de geração das usinas térmica:

$$f_1 = w_c \cdot c(\mathbf{Pgt}) \quad (13)$$

onde  $w_c$  é o peso que pondera a minimização de custo das térmicas; representada por uma função quadrática que

representa custo total de produção das térmicas durante todo o mês,  $c(\mathbf{Pgt})$ ,

- minimização do custo de déficit geração:

$$f_2 = w_{fic} \cdot c(\mathbf{Pgfic}) \quad (14)$$

onde  $w_{fic}$  é o peso que pondera a minimização do custo de corte de carga; e é uma função linear representada pela função  $c(\mathbf{Pgfic})$ ,

- minimização das perdas elétricas:

$$f_3 = w_p \cdot \sum_{k=1}^{np} \sum_{i=1}^{nb} (Pgh_i^k + Pgt_i^k) \quad (15)$$

onde  $w_p$  é o peso que pondera a minimização de perdas;  $nb$  é o número de barras e  $Pgh_i^k$  é a geração de potência hidráulica ativa na barra  $i$ , patamar  $k$  e  $Pgt_i^k$  é a geração de potência térmica ativa na barra  $i$ , patamar  $k$ ,

- minimização do tráfego de fluxo de potência através das linhas de intercâmbio: para tanto, a estratégia é maximizar as variáveis de folga das restrições dos limites mínimo e máximo de intercâmbio ( $sflmin$  e  $sflmax$ , respectivamente). Ao se maximizar as variáveis de folga, estar-se-á aumentando a distância entre o valor do fluxo que circula pelas linhas e o seu limite máximo de transmissão (Moraes et al 2018):

$$f_4 = -w_{fluxo} \cdot \sum_{j \in \text{linhas monitoradas}} (sflmin_j + sflmax_j) \quad (16)$$

onde  $w_{fluxo}$  é o peso que pondera a minimização das variáveis de folga relacionadas às restrições de FLUXO nas linhas;  $sflmin_j$  e  $sflmax_j$  são variáveis de folga referentes às restrições de limites mínimos e máximos de fluxo pelas linhas de intercâmbio,

- Minimização dos desvios de potência térmica entre despachos obtidos via programação energética e elétrica:

$$f_5 = w_{term} \cdot \sum_{i \in \text{térmicas}} (Pgt_i - Pgt_{energético_i})^2 \quad (17)$$

onde  $w_{term}$  é o peso que pondera a minimização de desvio de geração térmica,  $Pgt_i$ , em relação aos estudos energéticos prévios de despacho hidrotérmico,  $Pgt_{energético_i}$ .

Com isso, a modelagem completa simplificada da função objetivo compreende a soma das funções (13)-(17), sujeito às restrições (7)-(12).

Para solução do FPOD representado pelo conjunto de equações (24) utiliza-se o Método dos Pontos Interiores versão Primal-Dual (MPI) tal como (Granville 1994).

Devido a diferentes unidades e dimensão de cada parcela, todos os resultados foram normalizados para permitir uma melhor visualização dos resultados e facilitar a comparação, conforme mostra o conjunto de equações (18).

$$f_{1norm} = \sum c(Pgt_i) / \sum c(Pgtmax_i)$$

$$f_{2norm} = \sum c(Pgfc_i) / \sum Pd_i$$

$$f_{3norm} = \sum Pgh_i / \sum Pghmax_i \quad (18)$$

$$f_{4norm} = \sum (slmax_j + slmin_j) / \sum 2 \cdot flmax_j$$

$$f_{5norm} = \sum (Pgt_i - Pgtenergetico_i) / \sum Pgtenergetico_i$$

onde

$Pghmax_i$  : limite máximo de geração de potência ativa do gerador hidráulico conectado na barra  $i$ ;

$Pgtmax_i$  : limite máximo de geração de potência ativa do gerador térmico conectado na barra  $i$ ;

$Pd_i$  : potência ativa demandada na barra  $i$ ;

$flmax_j$  : limite máximo de potência ativa que pode fluir pelo ramo monitorado.

Com a aplicação da normalização, garante-se que os valores da função objetivo variem entre 0 e 1, o que facilita a comparação dos resultados.

A próxima seção descreve as análises realizadas a fim de descobrir os valores ideais de pesos que multiplicam as funções de cada critério de otimização.

### 3. CARACTERIZAÇÃO DAS PARCELAS DA FUNÇÃO OBJETIVO

Para a escolha dos pesos que devem ser utilizados para se executar o FPOD, será utilizado método da Matriz Esforço versus Impacto que tem o objetivo de priorizar soluções em processos de tomada de decisão.

A Matriz Esforço versus Impacto apresenta a contribuição de cada solução, confrontando o benefício atingido e a energia despendida com cada solução (Jorn 2010).

O esforço pode ser entendido pelo volume de trabalho necessário para concretizar a solução em questão. Um alto valor de esforço implica negativamente no projeto. O impacto, por sua vez, trata-se do ganho obtido com a concretização da solução em questão e um valor alto de impacto afeta positivamente o projeto.

Graficamente, a Matriz Esforço versus Impacto pode ser vista como um diagrama de dispersão, onde o eixo das abcissas representa o esforço da solução em análise, enquanto que o eixo das ordenadas representa seu impacto, conforme ilustra a Fig. 1.

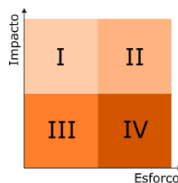


Fig. 1: Matriz Esforço versus Impacto.

Essa matriz distribui as soluções em quatro quadrantes:

- Quadrante I: baixo esforço e alto impacto. Alto valor agregado para o projeto sem grandes esforços;
- Quadrante II: alto esforço e alto impacto. Alto valor agregado para o projeto, porém demanda muito esforço;
- Quadrante III: baixo esforço e baixo impacto. Sem grande acréscimo de valor ao projeto, porém de baixo esforço;
- Quadrante IV: alto esforço e baixo impacto. Sem grande acréscimo de valor e de alto esforço.

Portanto, a solução desejada é aquela que apresenta um alto impacto com um baixo esforço.

Deve-se, primeiramente, definir os critérios de comparação que serão utilizados no processo de solução do FPOD, conforme estratégia e interesse do projeto.

Na sequência, realiza-se a escolha dos valores dos pesos, que representam as notas a serem dadas aos critérios de comparação. A escolha dos pesos é feita, geralmente, de maneira empírica, conforme a experiência dos membros envolvidos no projeto.

Uma vez definidos os critérios de comparação e os pesos, busca-se escolher regras bem definidas que explicitem o conhecimento do problema e que deem apoio à tomada de decisão.

É interessante que as primeiras regras sejam a avaliação de cada critério isoladamente, a fim de verificar a influência do seu impacto e seu esforço nos resultados. Conhecendo a sensibilidade de cada critério, podem-se desenvolver associações entre os critérios de comparação, de modo que uma mesma regra envolva lógicas mais complexas entre os critérios, visando deixar o modelo o mais detalhado e próximo do real possível.

Cada regra é, então, avaliada, recebendo um peso para seu impacto e outro para seu esforço. Na sequência, os pesos são somados para encontrar o impacto e o esforço global da solução em estudo.

Com os pesos de cada solução em mãos, plota-se a Matriz Esforço versus Impacto e verifica-se qual solução é a mais próxima da ideal, ou seja, a mais próxima do 1º quadrante, que traz um maior impacto e um menor esforço.

#### 3.1 Definição dos critérios e suas regras

Para a comparação dos resultados da combinação dos pesos utilizados neste trabalho foram definidos sete critérios de comparação. Cada critério recebe uma nota de acordo com seu resultado e é classificado no quesito impacto e esforço como alto, médio ou baixo. Os valores limites, adotados para a avaliação de cada regra, são definidos de acordo com a margem de variação dos valores apresentados em cada critério para todos os cenários simulados. Os critérios adotados são:

- I. tempo de simulação computacional;
- II. quantidade de iterações para convergência;
- III. valor da parcela 1 da função objetivo;
- IV. valor da parcela 2 da função objetivo;
- V. valor da parcela 4 da função objetivo;

- VI. valor da parcela 5 da função objetivo;
- VII. perdas elétricas DC.

Além da definição dos valores limites de cada uma das regras, é também necessário atribuir os significados para a atribuição de cada conceito, ou seja, entender o significado do termo impacto e esforço para o problema em questão. O problema que se pretende resolver com esta metodologia consiste na definição dos pesos que serão utilizados na função objetivo do FPOD, descrito na seção anterior. Nesse caso, entende-se como esforço a dificuldade em realizar o despacho na rede elétrica do SIN e, como impacto, a diminuição de custo para o processo, seja custo computacional ou financeiro.

As duas primeiras restrições refletem questões de performance computacional, sendo assim, entende-se que quanto maior o tempo de simulação e a quantidade de iterações maior será o esforço e menor será o impacto devido ao aumento do custo computacional.

Para o valor da parcela 1 da função objetivo, entende-se que quanto maior seu valor menor será o esforço do problema, pois terá mais unidades geradores despachando no sistema. Entretanto o impacto será baixo, pois se está aumentando os custos associados. Para o valor da parcela 2, quanto maior quantidade de deficit no sistema, maior será o esforço do problema devido a necessidade de corte de carga e menor será o impacto dela, pois terá o aumento dos custos do sistema.

A parcela 4 da função objetivo representa o déficit de geração em cada subsistema que origina a necessidade de fluxo de intercâmbio. Nesse caso, quanto maior o déficit de geração, maior será a necessidade de fluxo de intercâmbio, que pode esbarrar nos limites de intercâmbio das linhas dificultando na realização do despacho do SIN, ou seja, maior será o esforço. No viés do impacto, entende-se que quanto maior o fluxo de intercâmbio, maiores serão as perdas equivalentes nas linhas, diminuindo o impacto para o problema.

Em relação à parcela 5, quanto maior o desvio de geração térmica em relação à meta, menor será o impacto devido ao aumento do custo associado de geração; por outro lado, menor será o esforço para o despacho do SIN, uma vez que terá maior número de unidades geradoras operando.

Por fim, em relação às perdas elétricas, entende-se que, quanto menores as perdas no sistema, menor será o impacto da solução no problema, pois terá a redução dos custos do sistema. Já em relação a esforço, entende-se que o valor das perdas não influencia no esforço para despacho da rede elétrica do SIN.

A Tabela 1 apresenta as regras definidas para a solução do problema que utilizou a rede elétrica fornecida pelo caso PAR-ONS referente ao ano de 2017 (inverno) que possui 6352 barras e 9269 linhas para cada patamar de carga.

Analizando cada critério, é de fácil entendimento sua classificação em impacto e esforço alto, médio e baixo com base nos valores limites e seguindo a definição do significado de esforço e impacto adotados. Nessas regras, os valores limites foram definidos de acordo com os resultados

apresentados em simulações exaustivas, cujas principais combinações de pesos consideradas estão apresentadas na Tabela 2, cujos valores das parcelas estão apresentados na Tabela 3, de forma a possibilitar a classificação das simulações nestes três vieses comparativos de alto, médio e baixo esforço e impacto.

Pelas regras definidas, percebe-se que quatro delas apresentam um comportamento diretamente proporcional, ou seja, quanto maior o esforço menor será o impacto e vice-versa. Duas delas apresentam comportamento inversamente proporcional, ou seja, obter alto impacto requer alto esforço e, por fim, uma delas avalia apenas o impacto.

### 3.2 Avaliação dos Casos e Definição do Melhor Peso

Cada caso de combinação de peso simulado teve seus resultados confrontados com as regras definidas para cada critério e consequentemente receberam sua classificação numérica refletindo o esforço e impacto, sendo:

- 1 para esforço alto e impacto baixo;
- 2 para esforço médio e impacto médio;
- 3 para esforço baixo e impacto alto.

A classificação resultante de cada critério é então somada para garantir uma classificação única referente ao esforço e impacto global de cada caso simulado, sendo que o resultado desejado deve apresentar o menor esforço e o maior impacto possível. A Fig. 2 apresenta o resultado da matriz de comparação entre esforço e impacto utilizando os critérios de comparação definidos.

É possível perceber que, pelas regras e limites definidos, existem quatro tipos característicos de solução. O primeiro tem como pior classificação os casos com baixo esforço e baixo impacto que não apresenta melhorias significativas na solução e contempla os casos 17, 18, 21 e 22. O segundo grupo tem como pior classificação resultados com alto esforço e médio impacto que representam soluções com características de convergência de despacho complicada, mas apresentam melhorias nos custos que contemplam os casos 1, 2, 3, 4 e 5. Por fim, os dois últimos grupos apresentam as soluções candidatas de interesse e estão concentradas dentro dos retângulos laranja, que representam soluções com alto impacto e baixo esforço (casos 7, 10, 11, 14, 15, 19 e 20) e médio esforço e alto impacto (casos 6, 8, 9, 12 e 13).

Ao todo existem treze soluções na região de interesse, sendo que cinco estão empatadas na região de alto impacto e médio esforço e sete que estão empatadas na região de alto impacto e baixo esforço. Percebe-se que estas simulações que estão empatadas apresentaram resultados muito parecidos em seus critérios, sendo alguns exatamente o mesmo, refletindo a estagnação da solução frente a variação dos pesos, conforme citado anteriormente.

Assim, a melhor solução obtida consiste no caso 16. Essa solução apresentou de forma isolada o melhor impacto para a solução do problema, ou seja, o menor custo. Apesar dessa solução apresentar esforço um pouco maior que as demais, ela apresentou o maior impacto global, o que justifica sua escolha.

**Tabela 1. Regras para avaliação de esforço e impacto para cada critério**

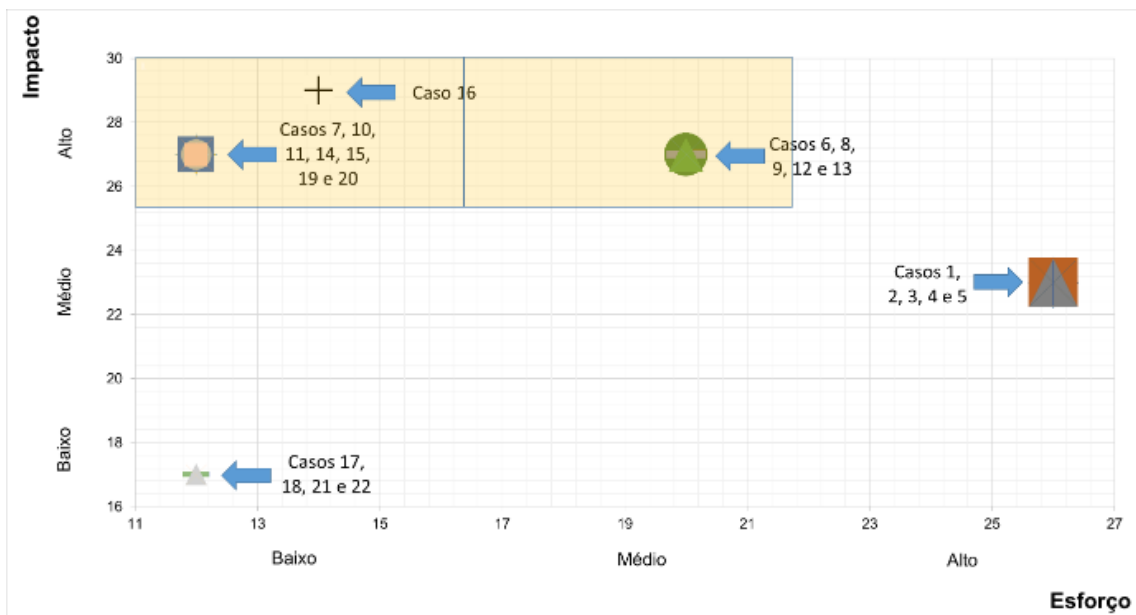
Critério	Impacto			Esforço		
	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
I	> 100	≤ 100 e ≥ 60	< 60	<60	≤ 100 e ≥ 60	> 100
II	> 110	≤ 110 e ≥ 60	< 60	< 60	≤ 110 e ≥ 60	> 110
III	> 0,599	≤ 0,599 e ≥ 0,597	< 0,597	> 0,599	≤ 0,599 e ≥ 0,597	> 0,597
IV	> 2,55x10 <sup>-4</sup>	≤ 2,55x10 <sup>-4</sup> e ≥ 2,55x10 <sup>-6</sup>	< 2,55x10 <sup>-6</sup>	< 2,55x10 <sup>-6</sup>	≤ 2,55x10 <sup>-4</sup> e ≥ 2,55x10 <sup>-6</sup>	> 2,55x10 <sup>-4</sup>
V	≥ 0,8079	< 0,8079 e ≥ 0,805	< 0,805	<0,805	< 0,8079 e ≥ 0,805	≥ 0,8079
VI	> 0,1371	≤ 0,1371 e ≥ 0,1359	< 0,1359	> 0,1371	≤ 0,1371 e ≥ 0,1359	< 0,1359
VI	>103,6	≤ 103,6 e ≥ 103,5	< 103,5	-	-	-

**Tabela 2. Simulações para escolha preliminar dos pesos da função objetivo**

Teste	wc	wfic	wp	wfluxo	wterm	Teste	wc	wfic	wp	wfluxo	wterm
1	1	10	0	0	0	12	1	10	10	1	1
2	1	10	0	0	1	13	1	10	10	1	10
3	1	10	0	0	10	14	1	10	10	10	1
4	1	10	1	0	10	15	1	10	10	10	10
5	1	10	10	0	10	16	1	10	10	10	100
6	1	10	10	1	10	17	1	10	10	100	10
7	1	10	10	10	10	18	1	10	10	100	100
8	1	10	1	1	1	19	1	10	100	10	10
9	1	10	1	1	10	20	1	10	100	10	100
10	1	10	1	10	1	21	1	10	100	100	10
11	1	10	1	10	10	22	1	10	100	100	100

**Tabela 3. Resultados obtidos para os testes de escolha preliminar dos pesos**

Teste	Tempo [s]	Iter.	F1 p.u.	F2 p.u.	F3 p.u.	F4 p.u.	F5 p.u.	Perdas DC p.u.	Teste	Tempo [s]	Iter.	F1 p.u.	F2 p.u.	F3 p.u.	F4 p.u.	F5 p.u.	Perdas DC p.u.
1	157,05	183	0,5961	1,81E-08	0,5456	0,8196	0,1356	103,0312	12	85,52	99	0,5964	1,00E-05	0,5456	0,8038	0,1357	103,5511
2	130,90	149	0,5961	1,70E-08	0,5456	0,8196	0,1356	103,0305	13	88,23	102	0,5964	1,01E-05	0,5456	0,8038	0,1357	103,5511
3	148,64	177	0,5961	1,49E-08	0,5456	0,8196	0,1356	103,0307	14	51,32	58	0,5987	1,01E-04	0,5455	0,8041	0,1359	103,5594
4	150,94	174	0,5961	1,73E-08	0,5456	0,8196	0,1356	103,0313	15	50,98	57	0,5987	1,01E-04	0,5455	0,8041	0,1359	103,5593
5	148,14	174	0,5961	1,23E-08	0,5456	0,8196	0,1356	103,0307	16	49,11	55	0,5984	1,03E-04	0,5455	0,8041	0,1358	103,5565
6	93,23	102	0,5964	1,01E-05	0,5456	0,8038	0,1357	103,5511	17	39,22	42	0,6177	1,00E-03	0,5445	0,8062	0,1377	103,6465
7	51,08	57	0,5987	1,01E-04	0,5455	0,8041	0,1359	103,5593	18	38,66	41	0,6146	1,00E-03	0,5446	0,8062	0,1373	103,6472
8	83,65	96	0,5964	1,00E-05	0,5456	0,8038	0,1357	103,5511	19	49,39	55	0,599	1,01E-04	0,5455	0,8041	0,1359	103,559
9	90,22	103	0,5964	1,01E-05	0,5456	0,8038	0,1357	103,5509	20	48,61	53	0,5987	1,03E-04	0,5455	0,8041	0,1359	103,5562
10	50,92	57	0,5987	1,01E-04	0,5455	0,8041	0,1359	103,5595	21	38,58	40	0,6203	1,00E-03	0,5445	0,8065	0,138	103,6435
11	51,93	58	0,5987	1,01E-04	0,5455	0,8041	0,1359	103,5594	22	39,08	41	0,6168	1,10E-03	0,5445	0,8062	0,1376	103,6451



**Fig. 2: Resultado da matriz de esforço versus impacto com sete critérios de comparação**

## REFERÊNCIAS

Assim, conclui-se que os melhores pesos que devem ser utilizados para se simular o sistema considerado são:  $wc = 1$ ,  $wfic = 10$ ,  $wp = 10$ ,  $wfluxo = 10$  e  $wterm = 100$ .

Os tempos computacionais obtidos para executar o caso SIN 2017 pelo FPOD linear, considerando todos os pesos unitários, dispense muito tempo, tal como: 378 iterações e 209 s para um sistema com 6321 barras. E, após os ajustes dos pesos ( $wc=1$ ;  $wfic =10$ ,  $wp=0$ ,  $wterm=100$ ,  $wfluxo=0$ ), obtiveram-se os seguintes resultados: 54 iterações e 26,74 s para um sistema com 6321 barras. Ou seja, conseguiu-se uma redução percentual de 87,21% do tempo computacional obtido originalmente na formulação do FPOD.

## 6. CONCLUSÕES

Foi descrita a análise dos cenários de configuração dos pesos das funções objetivos do FPOD através de matriz esforço versus impacto, na qual se buscou a solução de menor esforço e maior impacto. Conclui-se que os pesos que serão utilizados durante as simulações do despacho hidrotérmico do caso SIN analisado consistem em  $wc = 1$ ,  $wfic = 10$ ,  $wp = 10$ ,  $wfluxo = 10$  e  $wterm = 100$ ; lembrando que o peso  $wc$  refere-se ao custo-térmica,  $wfic$  ao custo-deficit,  $wfluxo$  à mínima circulação de fluxo pelas linhas de intercâmbio,  $wp$  às mínimas perdas e  $wterm$  ao desvio de geração térmica em relação ao especificado pelo energético.

Com base nos resultados obtidos, foi possível perceber que, dependendo do critério considerado, o aumento de seu peso melhora o resultado de alguns padrões de avaliação, mas, em contrapartida, piora o resultado de outros padrões. Esse tipo de comportamento é de difícil avaliação, pois é necessário se fazer escolha direcionada para o padrão de interesse. Nesse sentido, a metodologia da matriz esforço x impacto proposta permitiu a obtenção da ponderação adequada de cada critério de otimização de modo a fornecer o melhor resultado para todos os padrões de avaliação. Os resultados foram apresentados para o Sistema Interligado Nacional referente ao PAR-2017 (carga pesada, média e leve).

A análise do matriz esforço versus impacto também influenciou no tempo computacional. Verificou-se que, juntamente com a escolha dos melhores pesos, houve redução no tempo computacional em relação a versão original do FPOD linear que não ponderou nenhum critério de otimização em particular.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido pelo *Lynx Energy Research Group* no âmbito do projeto de P&D PD-6491-0307/2013, proposto pela Copel Geração e Transmissão S.A., sob os auspícios do Programa de P&D da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Os autores agradecem também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelos subsídios para importação mediante a lei 8010/1990, L.I. 17/3098290-0.

- Andriolo, R., Fernandes, T. P., Bessa, M. R., Bloor, M. (2015). Electric and energy coupling for long-term operation considering transmission restrictions, *Journal Contr. Autom. Electr. Syst.*, vol. 26, 6, p. 686–700.
- Borges, S., Fernandes, T. S.P., Almeida, K.C. (2011). Hydrothermal pre-dispatch of active and reactive power via method of interior points and rectangular coordinates. *Revista Controle & Automação*, vol. 22, No.5, 479-494.
- CEPEL (2010). Manual de Referência do modelo ANAREDE. RJ.
- CEPEL (2016). Manual de Referência do modelo NEWAVE VERSÃO 22, Rio de Janeiro.
- Granville, S. (1994). Optimal Reactive Power Dispatch Through Interior Point Methods. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, nº 1, pp. 136–146.
- Jorn, A., Fagerhaug, T., Beltz, M. (2010). Root Cause Analysis and Improvement in the Healthcare Sector. *ASQ Quality Press*, Milwaukee Wisconsin, p. 256
- Kumar, S. V., e Mohan, M. R. (2011). A genetic algorithm solution to the optimal short-term hydrothermal scheduling, *Electrical Power Energy Systems* 33, p. 827-835.
- Leite, P.T., Carneiro, A. A., Carvalho, A. C., e Carvalho L. F. (2002). Energetic Operation Planning Using Genetic Algorithms, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 17, n. 1, p. 173–179.
- Marcilio, D. C (2014). Otimização do Despacho Hidrotérmico Utilizando o Método de Lagrangeano Aumentado com Gradiente Espectral Projetado, Tese de Doutorado, UFPR, Curitiba.
- Moraes, R.A., Fernandes, T. S. P., Arantes, A., Vila, C.U. (2018). Short-Term Scheduling of Integrated Power and Spinning Reserve of a Wind-Hydrothermal Generation System with AC Network Security Constraints. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 2018, Volume 29, Number 1, Page 1
- Provençano, F. (2003). *Despacho Econômico em Usinas Hidrelétricas*. Dissertação de Mestrado, Unicamp.
- Ramos, J. L. M., Lora, A. T., Ramos, J. R., Exposito, A. G. (2011). Short-term Hydro-thermal coordination based on interior point nonlinear programming and genetic Algorithms, *IEEE Porto Power Tech Conference*. Porto, Portugal.
- Resende, J. F., Fernandes, T. S. P., Pereira, G. M., Lachovicz, F. J., Bessa; M. R., Tortelli, e O. L.O. L. (2018). Adaptação de dados do Sistema Interligação Nacional (SIN) para simulação de Fluxo de Potência Ótimo Linear aplicado ao Planejamento hidrotérmico de médio prazo, *In: XIV Symposium of Specialists in Operation Planning and Electrical Expansion*, Recife: Chesf, p. 1-8.
- Sifuentes, S., e Vargas, A. (2007). Hydrothermal Scheduling Using Benders Decomposition: Accelerating Techniques, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 22, n. 31, pp. 1351–1359.
- Szuovoviviski, I. Alocação simultânea de bancos de capacitores e reguladores de tensão em sistemas de distribuição usando algoritmos genéticos e fluxo de potência ótimo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- Tagigawa, Y. K. F., Silva, E. L., Finardi E. C., e Rodrigues, R.N. (2012). Solving the hydrothermal scheduling problem considering network constraints. *Electric Power systems Research* 88, p. 89-97.