Analysis of the Impact of Optimal Power Flow Solutions in Security Regions

João Marcos Rabelo Baccarini * **Wesley Peres** * **Lane Maria Rabelo** *

* *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEL/UFSJ/CEFET-MG), Departamento de Engenharia Elétrica (DEPEL), Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), São João del-Rei, MG, Brasil (e-mails: jaomarcos.rb@hotmail.com; wesley.peres@ufsj.edu.br; rabelolane@ufsj.edu.br).*

Abstract: Security Regions (SR) are graphical tools used globally in electric power transmission operation centers, including in Brazil, represented by three-dimensional graphs that allow the analysis of the system's safety margin in response to variations in generator power. Optimal Power Flow (OPF) is a computational technique that optimizes energy distribution, minimizing losses while meeting operational constraints. Although a system with low losses is ideal, it is crucial to evaluate these conditions from the perspective of operational safety. This work investigates how the solutions obtained by OPF impact the SR in the New England system, using the ANAREDE software, seeking to identify whether the point of minimum losses compromises the system's safety.

Resumo: As Regiões de Segurança (RS) são ferramentas gráficas utilizadas globalmente em centros de operação de transmissão de energia elétrica, inclusive no Brasil, representadas por gráficos tridimensionais que permitem analisar a margem de segurança do sistema frente a variações na potência dos geradores. O Fluxo de Potência Ótimo (FPO) é uma técnica computacional que otimiza a distribuição de energia, minimizando perdas e atendendo às restrições operacionais. Embora um sistema com baixas perdas seja ideal, é crucial avaliar essas condições sob a ótica da segurança operacional. Este trabalho investiga como as soluções obtidas pelo FPO impactam as RS no sistema de *New England*, utilizando o software ANAREDE, buscando identificar se o ponto de mínimas perdas compromete a segurança do sistema.

Keywords: Security Regions, Optimal Power Flow, Electric Power Systems, ANAREDE.

Palavras-chaves: Regiões de Segurança, Fluxo de Potência Ótimo, Sistemas Elétricos de Potência, ANAREDE.

1 Introdução

A energia elétrica é um bem indispensável atualmente, seja para uso comercial, industrial, residencial ou rural. A falta desse insumo causa prejuízos econômicos e sociais também. Por isso, é necessário que exista uma rede que leve energia para todos e que seja confiável e segura. À essa rede é dado o nome Sistema Elétrico de Potência (SEP), responsável por garantir a transmissão e distribuição desse recurso de maneira segura.

Os estudos de planejamento e operação do SEP utilizam muitas simulações computacionais. Dentre elas destacam-se o fluxo de potência e o fluxo de potência ótimo (FPO). O fluxo de potência permite calcular o ponto de operação atual do sistema, ou seja, verificar o quanto cada gerador está fornecendo de potência, o quanto de potência flui por cada ramo, a magnitude e o ângulo das tensões nodais, entre outros. Já o FPO, como revisado por Molzahn et al. (2017), calcula o ponto de operação da rede que otimiza um determinado critério, como as perdas de potência ativa, que devem ser as menores possíveis.

Esses dois algoritmos também são necessários para gerar as condições iniciais para a análise de estabilidade. Através deles é possível identificar cenários de operação que violem limites físicos e normativos. Para isso, uma grande quantidade de resultados deve ser processada e analisada, o que demanda tempo e pode ser ineficiente, conforme discutido por Virmani and Savulescu (2008). Sendo assim, as Regiões de Segurança (RS) surgem como uma alternativa gráfica que facilita essas análises.

Conforme revisado no trabalho de Morison et al. (2004), as RS são amplamente aplicadas nos centros de operação ao redor do mundo e permitem analisar se determinado ponto de operação é seguro, bem como a sua distância em relação aos limites de segurança. Avila et al. (2021) as define como gráficos tridimensionais em que cada eixo representa um grupo de potência do sistema (como três grupos de geração), permitindo o mapeamento das condições de operação à medida que ocorre a transferência de potência entre os três grupos. Nesses gráficos são definidas bordas que permitem quantificar o quanto o ponto de operação está distante dos limites de operação (margem de segurança). Se um ponto de operação estiver no interior da RS este é considerado seguro.

Uma das ferramentas computacionais comerciais utilizadas para desenhar e analisar as RS é o software Anarede, desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Engenharia Elétrica) e disponível em CEPEL (2024). Este programa possui um conjunto de aplicações computacionais para análise de SEP em regime permanente. Além de RS, este também tem módulos para fluxo de potência, análise de contingências, análise de sensibilidade, etc.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto da solução do Fluxo de Potência Ótimo para minimização de perdas no formato das Regiões de Segurança em sistemas de transmissão. Deseja-se verificar se as condições operativas de mínimas perdas são seguras a partir da análise das RS. O sistema *New England* será utilizado nas análises.

2 Metodologia de Análise

2.1 Ferramenta da Construção da Região de Segurança

O trabalho de Jardim et al. (2006) apresenta que as Regiões de Segurança também são empregadas no Centro de Operação do Sistema (COS) do Operador Nacional do Sistema (ONS). Se tratando de um gráfico tridimensional, em que cada eixo representa um grupo de geração (somatório de potências), é possível analisar a margem de segurança do sistema diante da variação de potência entre esses grupos.

A Figura 1 mostra um exemplo de RS.

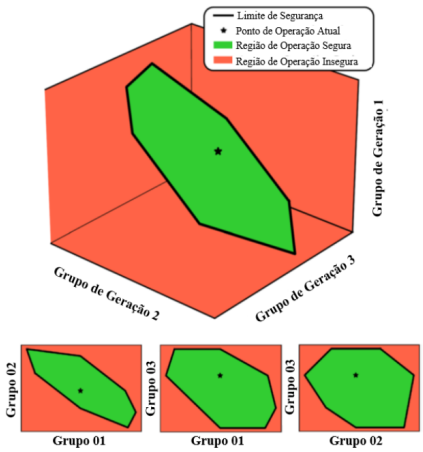

Figura 1. Regiões de Segurança. Fonte: Carvalho et al. (2022)

As Regiões de Segurança serão obtidas utilizando a versão acadêmica do software ANAREDE. O processo de contrução das RS pode ser dividido em 4 partes:

(1) Divisão do sistema em três grupos de geração;
(2) Determinação dos limites;
(3) Determinação das regiões geradoras e consumidoras;
(4) Cálculo dos fatores de participação (individuais e de grupo).

O detalhamento de cada uma dessas etapas foi feito por Almeida et al. (2013) e Carvalho et al. (2022) e será abordado de forma mais concisa nessa seção.

2.1.1 Divisão do Sistema

Cada eixo do gráfico tridimensional representa um grupo de geração pré definido de acordo com os objetivos do estudo, podendo ser formado por apenas um ou mais geradores.

O número de grupos é selecionado como 3, pois isso torna possível a análise de uma grande parte dos cenários de geração de interesse no sistema brasileiro. Conforme Sant'Anna et al. (2011), um dos grupos vai atuar como grupo de referência, fazendo o balanço entre geração, consumo e o fechamento de perdas. Além disso, embora possível, aumentar o número de eixos faria com que o problema ficasse mais complexo, aumentando o esforço computacional para obtenção das RS.

2.1.2 Determinação dos Limites e Direção de Busca

A Figura 2 mostra o processo de construção das RS adotando 6 direções de busca distintas. Tomando como base o ponto de operação, definem-se as direções a partir de um ângulo de direção θ. As direções são importantes nos passos 3 e 4 da construção das RS.

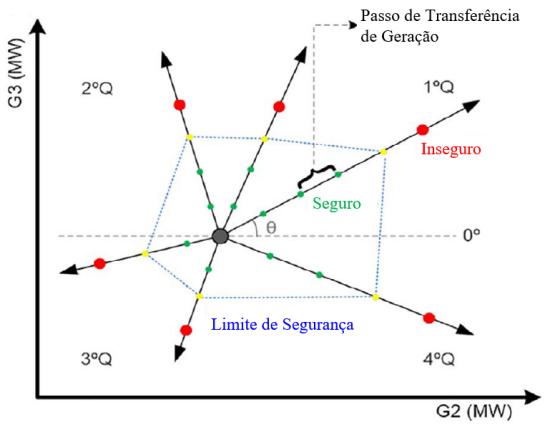

Figura 2. Direções de busca. Fonte: Carvalho et al. (2022)

Cada um dos pontos mostrados na figura representa uma solução do fluxo de potência. A cor deles determina se os limites foram violados ou não, e consequentemente a segurança do ponto de operação. Os verdes são os locais onde os limites estão respeitados, os amarelos são as fronteiras e os vermelhos indicam que ao menos um limite foi violado.

Para a construção das RS são considerados quatro limites de operação:

(1) Limite de Tensão: representa os valores máximo e mínimo de tensão para as barras do sistema;
(2) Limite Térmico: representa o valor máximo de carregamento (MVA) para as linhas do sistema;
(3) Limite de Potência Ativa: representa os valores máximo e mínimo de geração de potência ativa para os geradores do sistema;
(4) Limite de Potência Reativa: representa os valores máximo e mínimo de geração de potência reativa para os geradores do sistema.

Para que o ponto de operação seja considerado seguro e esteja no interior da RS, todos os limites devem ser respeitados.

2.1.3 Determinação das Regiões Geradoras e Consumidoras

A determinação de cada uma dessas regiões depende das direções de busca estabelecidas em 2.1.2 e mostradas na Figura 2. Para cada quadrante, os grupos 2 e 3 variam entre geradores (exportadores) e consumidores (importadores), enquanto o grupo 1 se adapta conforme necessário.

2.1.4 Determinação dos Fatores de Participação

No sistema em questão, a potência é transferida entre as regiões exportadoras e importadoras, de forma que a geração deve ser igual ao consumo somado das perdas. Sendo assim, quanto mais um grupo exporta potência, mais outro grupo deve importar. As expressões matemática para definir o *fator de grupo* foram retiradas de Tavela et al. (2022) e calculadas conforme (1).

$$\Delta G_i = FPG_i.passo \tag{1}$$

Sendo *passo*, o passo de transferência entre os grupos, FPG_i o fator de grupo e ΔG_i o incremento de potência de um grupo i. O somatório dos fatores das regiões importadoras e exportadoras devem ser iguais.

Após calculado o fator de participação de cada grupo, deve-se obter os fatores de participação individuais para cada um dos geradores j que compõe o grupo i, conforme mostra a equação (2).

$$FPI_j^i = \frac{P_{Gj}^{\max}}{\sum_{k\in\Omega_i} P_{Gk}^{\max}} \tag{2}$$

sendo $P_{Gj}^{\max}$ o limite máximo de potência ativa do gerador j e Ω_i o conjunto de geradores que compõe o grupo i. Em seguida um novo incremento de potência é dado para cada um dos geradores. A atualização dos valores de geração são mostradas em (3) e (4).

$$\Delta P_{Gj} = FP.I_j^i \cdot \Delta G_i \tag{3}$$

$$P_{Gj} = P_{Gj}^0 + \Delta P_{Gj} \tag{4}$$

Em que P_{Gj}^0 é a potência no ponto de operação inicial. Ressalta-se que a cada variação de potência, duas transições consecutivas de pontos verdes na Figura 2, atualiza-se as potências com relação à potência do ponto anterior. As potências definidas em (4) são as potências de barras PV (dados de entrada do fluxo de potência). O grupo de referência possui uma barra $V\theta$ responsável pelo balanço de potência. Em seguida, resolve-se um fluxo de potência e monitora-se a ocorrência de violações. Em caso de ocorrência, a variação de potência é finalizada para aquela direção de busca.

2.2 Formulação do FPO para Minimização de Perdas

Conforme Melo (2023), o Fluxo de Potência Ótimo (FPO) definido em (5), alia as equações de fluxo de potência com métodos de otimização, visando recalcular o estado operativo do sistema respeitando os limites e minimizando ou maximizando um determinado parâmetro, como as perdas de potência ativa.

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) \\ \text{sa} \quad & e(x) = 0 \\ & g^- \leq g(x) \leq g^+ \\ & x^- \leq x \leq x^+ \end{aligned} \tag{5}$$

sendo x as variáveis de controle; $f(x)$ a função objetivo; $e(x)$ as restrições de igualdade; $g(x)$ as restrições de desigualdade.

A função objetivo em (6) é o critério que se deseja minimizar, no caso, as perdas de potência ativa. Porém, existem outras alternativas para modelagem desta função, como: maximizar o carregamento, minimizar custo de despacho ou minimizar desvio do ponto operativo.

$$minf(x) = \sum_{km\in\Omega_L} P_{km} + Pmk \tag{6}$$

em que Ω_L é o conjunto de todos os ramos no sistema; P_{km} e P_{mk} são os fluxos direto e reverso de potência ativa no ramo km.

As restrições de igualdade em (5), dadas em (13)-(14), são o balanço de potência ativa e reativa em cada nó k do sistema.

$$P_{gk} - P_{dk} - V_k \sum_{m\in K} V_m \left(G_{km}\cos(\theta_{km}) + B_{km}\,\text{sen}(\theta_{km})\right) = 0 \tag{13}$$

$$Q_{gk} - Q_{dk} - V_k \sum_{m\in K} V_m \left(G_{km}\,\text{sen}(\theta_{km}) - B_{km}\cos(\theta_{km})\right) = 0 \tag{14}$$

em que: P_{gk} e Q_{gk} são as gerações de potência ativa de reativa, P_{dk} e Q_{dk} são as demandas de potência ativa e reativa, V_k e V_m são as magnitudes das tensões nas barras k e m, θ_{km} é a defasagem angular entres as barras k e m, G_{km} e B_{km} são os elementos (k, m) das matrizes de condutância e suceptância nodal; K é o conjunto de todas as barras conectadas à barra k incluindo ela própria.

As restrições dadas em (5), detalhadas em (7)-(12), indicam os limites operativos/normativos e físicos durante a operação de sistemas elétricos.

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max} \tag{7}$$

$$\theta_k^{min} \leq \theta_k \leq \theta_k^{max} \tag{8}$$

$$P_{km}^{min} \leq P_{km} \leq P_{km}^{max} \tag{9}$$

$$Q_{km}^{min} \leq Q_{km} \leq Q_{km}^{max} \tag{10}$$

$$P_{gk}^{min} \leq P_{gk} \leq P_{gk}^{max} \tag{11}$$

$$Q_{gk}^{min} \leq Q_{gk} \leq Q_{gk}^{max} \tag{12}$$

2.3 *Metodologia de Análise*

Para identificar o impacto da solução ótima na margem de segurança via RS, serão analisados alguns pontos de operação distintos.

O primeiro ponto a ser analisado é o caso base, cujos valores de geração de cada um dos grupos foram obtidos de Tavela et al. (2022). Para isso, será solucionado o fluxo de potência do sistema levando em consideração tal despacho. Por fim, serão obtidas as regiões de segurança para este caso.

Em seguida é necessário encontrar um ponto ótimo de operação através do Fluxo de Potência Ótimo. A solução desse algoritmo fornecerá o novo despacho dos geradores que minimiza as perdas de potência ativa. Considera-se que todos os geradores podem ser redespachados. Em seguida, o ponto de operação obtido será avaliado por meio da RS.

A última simulação de Fluxo de Potência Ótimo considera que somente alguns geradores podem ser redespachados para a minimização de perdas. Em seguida, o ponto de operação obtido será avaliado por meio da RS.

O fluxograma mostrado na figura 3 mostra o passo a passo para a construção das Regiões de Segurança em cada caso.

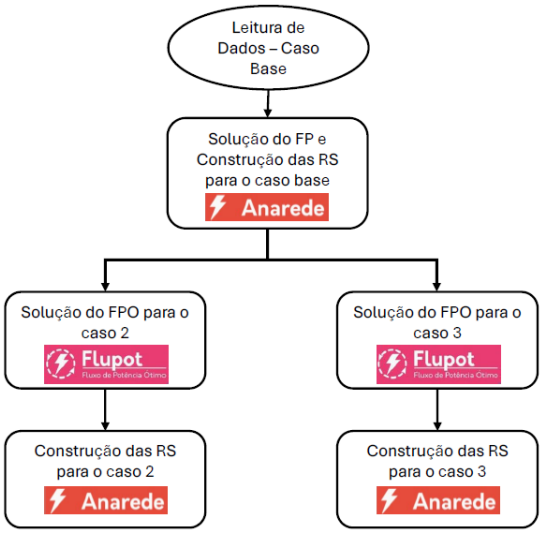

Figura 3. Fluxograma - Construção das RS

3 Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos para o sistema *New England*.

3.1 *Descrição do Sistema*

O sistema *New England* é mostrado na Figura 4. Todos os dados do sistema podem ser obtidos em Tavela et al. (2022) e Tinoco et al. (2021). Além disso, a divisão dos grupos proposta em Tavela et al. (2022) será utilizada neste trabalho. Trata-se de um sistema bastante utilizado para análise estática de sistemas elétricos de potência, contendo 10 geradores e 39 barras. Os valores de geração de cada grupo foram retirados de Tavela et al. (2022) e são mostrados na Tabela 1.

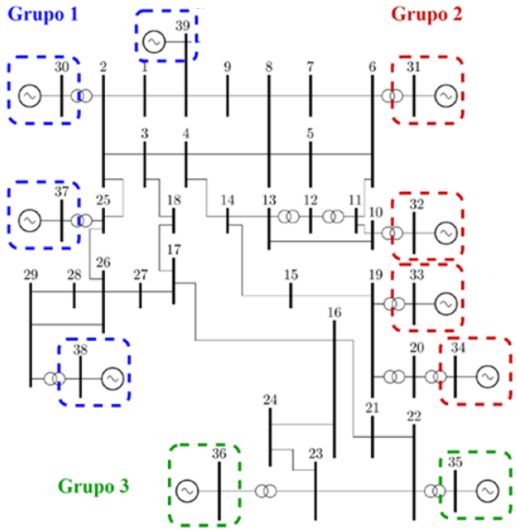

Figura 4. Sistema *New England*

Tabela 1. Valores de geração (MW)

—-	G1	G2	G3
Base	4514	2363,2	1210
Mínimo	0	0	0
Máximo	6000	4000	2000

3.2 *Casos Estudados*

Para este mesmo sistema foram analisados 3 pontos de operação distintos:

a) Caso 01: o ponto de operação atual, caso base;
b) Caso 02: o ponto ótimo, obtido através de um Fluxo de Potência Ótimo;
c) Caso 3: no qual é aplicado Fluxo de Potência Ótimo no sistema base, porém, os geradores pertencentes à área 2 não são redespachados pelo FPO. Ou seja, para a minimização de perdas, o FPO reajusta apenas o gerador da barra 30 e os das barras 35 a 39.

Além de desenhar a região de segurança de cada caso, foi analisada também as perdas de potência ativa e reativa de cada um deles. A Tabela 2 mostra tais dados.

Tabela 2. Perdas

Caso	Perdas (MW)	Perdas (MVAr)
Caso 01	91,6	770,8
Caso 02	50,4	399,1
Caso 03	57,8	412,1

Como era esperado, as perdas do caso 2 são as menores entre os cenários analisados, já que se trata do fluxo ótimo com maior grau de liberdade. Já para o caso 3, mesmo alguns geradores não sendo otimizados, as perdas diminuem bastante em relação ao caso base.

3.3 *Comparação das RS*

As regiões de segurança foram obtidas para cada um dos três casos analisados. Como cada grupo de geradores tem

seus limites e o gráfico resultante seria tridimensional. Porém, para facilitar a visualização, foram feitas 3 projeções bidimensionais, chamadas nomogramas, relacionando os grupos em duplas.

A área verde escura das figuras se refere à região em que todos os limites de operação são respeitados. A área vermelha mostra o oposto. Cada linha colorida e levemente pontilhada mostra os diferentes limites de operação: limite térmico, de potência ativa, de potência reativa, de segurança e de tensão. Quanto mais limites são excedidos, mais a cor da imagem tende a sair do verde e ir na direção do vermelho no espectro RGB, passando por amarelo e laranja por exemplo. Por fim, a pequena seta preta ao centro nas imagens com o escrito ”OP”mostra o ponto operativo do sistema (base ou otimizado).

As Figuras 5 a 7 mostram as regiões de segurança para o caso base. Observa-se pelas figuras que todos os limites são respeitados, já que o ponto de operação se encontra dentro da área verde (segura). Além disso, tal ponto se encontra distante das fronteiras, o que mostra uma boa margem de segurança. Ressalta-se ainda que o ponto base, marcado com a seta preta, está de acordo com a Tabela 1.

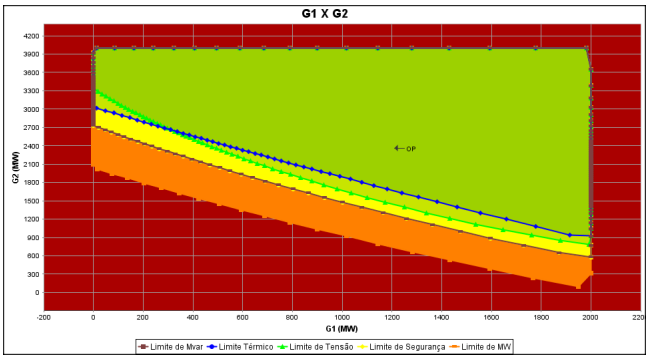

Figura 5. $G1 \times G2$ para o caso Base

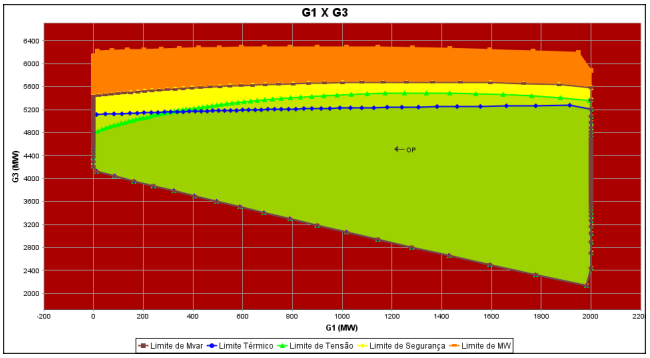

Figura 6. $G1 \times G3$ para o caso Base

As Figuras 8 a 10 mostram as RS para o caso 2. Analisando os gráficos, observa-se que para o ponto ótimo, o sistema ainda se encontra dentro de todos os limites estabelecidos. Além disso, os formatos dos gráficos são muito similares aos do caso 1, notando-se que os limites da área segura mudaram bastante, tendo sido reduzidos. Apesar disso, o ponto de operação ainda se encontra dentro da área verde, porém, um pouco mais próximo das fronteiras quando comparado com o caso base.

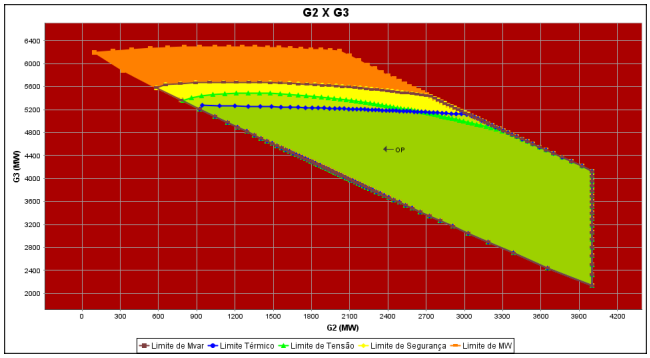

Figura 7. $G2 \times G3$ para o caso Base

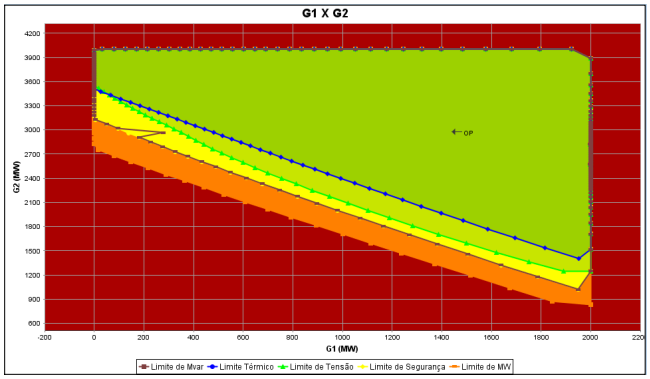

Figura 8. $G1 \times G2$ para o caso 2

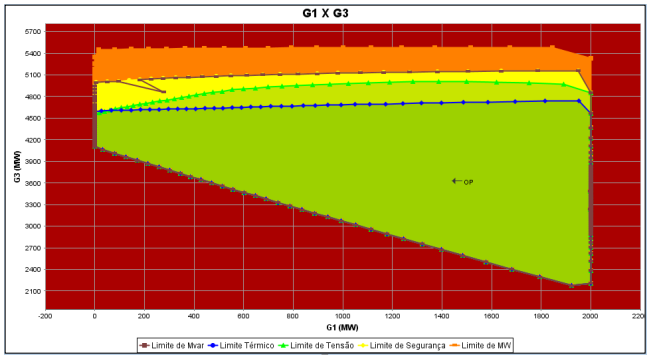

Figura 9. $G1 \times G3$ para o caso 2

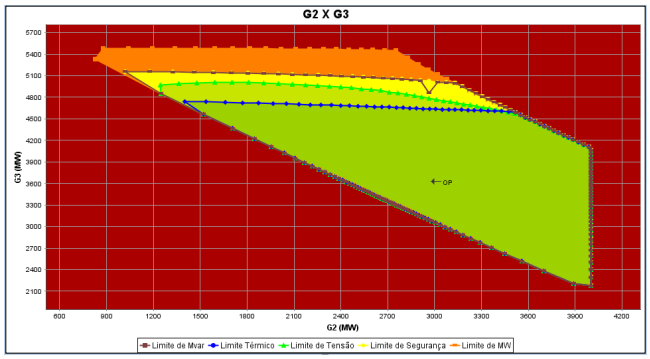

Figura 10. $G2 \times G3$ para o caso 2

Por fim, as Figuras 11 a 13 mostram os gráficos obtidos para o caso 3. Assim como aconteceu em todos os casos anteriores, o ponto de operação para o caso 3 também se encontra dentro da área verde, respeitando todos os

limites, mesmo com estes variando. As fronteiras para estes gráficos estão também menores, quando comparados com o caso base, e bem similares ao caso 2. Ademais, o valor de despacho para o grupo 2, mantido fixo pelo FPO, está de acordo com a Tabela 1.

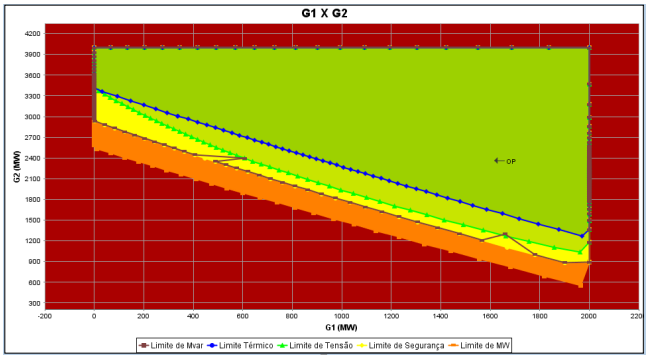

Figura 11. $G1 \times G2$ para o caso 3

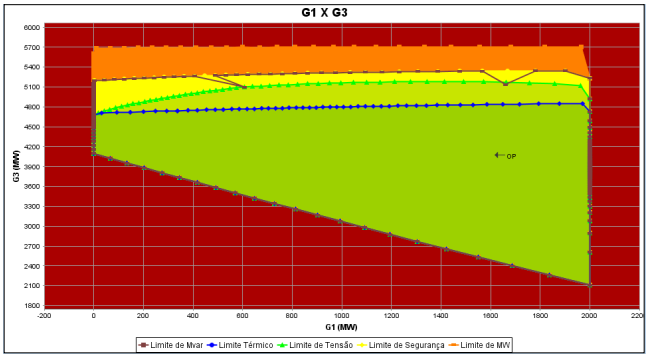

Figura 12. $G1 \times G3$ para o caso 3

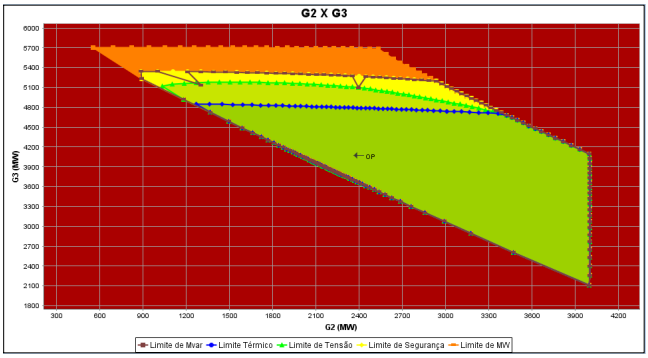

Figura 13. $G2 \times G3$ para o caso 3

4 Conclusão

Este trabalho avaliou o impacto que a minimização das perdas de uma sistema através do Fluxo de Potência Ótimo teve nas Regiões de Segurança. Foram comparados gráficos e resultados para cada um dos casos e as diferenças entre eles foi pontuada.

Conclui-se, então, que ao otimizar as perdas ativas em um sistema elétrico através do FPO, as Regiões de Segurança podem se alterar de forma notável. Tanto o ponto de operação quanto os limites se modificam, alterando o formato da região segura, o que significa que uma nova análise de segurança deve ser feita para cada ponto otimizado.

Para trabalhos futuros, fica a sugestão de se avaliar o impacto da solução do FPO nas Regiões de Segurança considerando contingências.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte recebido da FAPEMIG, INERGE, CNPq e PPGEL – UFSJ/CEFET-MG.

Referências

Almeida, F.C.B., Filho, J.A.P., Pereira, J.L.R., Henriques, R.M., and Marcato, A.L.M. (2013). Assessment of load modeling in power system security analysis based on static security regions. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. doi:https://doi.org/10.1007/s40313-013-0020-7.

Avila, O.F., Filho, J.A.P., and Peres, W. (2021). Steady-state security assessment in distribution systems with high penetration of distributed energy resources. *Electric Power Systems Research*, 201, 107500. doi:10.1016/j.epsr.2021.107500.

Carvalho, V.F., Peres, W., and Poubel, R.P.B. (2022). Impacto do reajuste de estabilizadores de sistemas de potência em nomogramas para a avaliação da segurança dinâmica. *Sociedade Brasileira de Automática*.

CEPEL (2024). Site do cepel. `https://www.cepel.br/produtos/anared-2/anarede/`. Acesso em 18 de Abril de 2024, 17:00.

Jardim, J., Neto, C., and dos Santos, M. (2006). Brazilian system operator online security assessment system. *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*. doi:https://doi.org/10.1109/PSCE.2006.296219.

Melo, I.D. (2023). *Fluxo de Potência: Teoria e Implementação de Códigos Computacionais*. Bucher.

Molzahn, D.K., Dörfler, F., Sandberg, H., Low, S.H., Chakrabarti, S., Baldick, R., and Lavaei, J. (2017). A survey of distributed optimization and control algorithms for electric power systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8. doi:10.1109/TSG.2017.2720471.

Morison, K., Wang, L., and Kundur, P. (2004). Power system security assessment. *IEEE Power Energy Mag.*, 2, 30–39. doi:10.1109/MPAE.2004.1338120.

Sant'Anna, E.G.S., Souza, A.C.Z., Assis, T.M., Schilling, M.T., Passos Filho, F.A., and Takahata, A.Y. (2011). Consolidação de uma metodologia de avaliação dos limites de intercâmbio em sistemas de grande porte. *Revista Controle and Automação*, 134–143.

Tavela, F.M., Filho, J.A.P., and Avila, O.F. (2022). Assessment of the impact of wind generation intermittency on electric power systems through security regions. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. doi:https://doi.org/10.1007/s40313-021-00870-2.

Tinoco, R.A.G., Passos Filho, J.A., Peres, W., and Henriques, R.M. (2021). A new particle swarm optimization-based methodology for determining online static security regions. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. doi:https://doi.org/10.1002/2050-7038.12790.

Virmani, S. and Savulescu, S.C. (2008). The real-time and study-mode data environment in modern scada/ems. *Real-Time Stab. Assess. Mod. Power Syst. Control Centers*, 1–21. doi:doi:10.1002/9780470423912.ch1.