

# Impacto do Reajuste de Estabilizadores de Sistemas de Potência em Nomogramas para a Avaliação da Segurança Dinâmica

Victor F. Carvalho \*. Wesley Peres\*. Raphael P. B. Poubel\*\*

\*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João del-Rei – UFSJ, São João del-Rei, Minas Gerais, Brasil (e-mail: victorferreiracarvalho@hotmail.com; wesley.peres@ufsj.edu.br)

\*\* Departamento de Engenharia Elétrica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Belo Horizonte, Brasil (e-mail: poubel@cefetmg.br)

---

**Abstract:** Dynamic Security Regions (DSR) are tridimensional graphics that evaluate power system security. For this purpose, the system is divided into three-generation groups. They allow the evaluation of different generation scenarios considering the security limits for the damping ratios associated with electromechanical oscillation modes. The literature shows that Power System Stabilizers (PSS) optimal tuning increases the damping ratios in closed-loop operation, and this paper investigates the PSS tuning on the DSR shape. The DSR is built using a Particle Swarm Optimization based approach, and the results are obtained for the New England test system.

**Resumo:** As Regiões de Segurança Dinâmica (RSD) são gráficos tridimensionais que permitem a avaliação da segurança do sistema. Para construção destas, o sistema elétrico é dividido em três grupos de geração. Estas permitem avaliar diferentes cenários de geração considerando os coeficientes de amortecimento associados aos modos de oscilação como limites de segurança. É sabido da literatura que o ajuste ótimo dos Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP) aumenta os coeficientes de amortecimento em malha fechada e nesse trabalho investiga-se o impacto do ajuste de ESP no formato das RSD. A construção das RSD é baseada na técnica *Particle Swarm Optimization* (PSO) e os resultados são obtidos para o sistema *New England*.

**Keywords:** Power System Security; Dynamic Security Regions; Power System Stabilizers; Particle Swarm Optimization; Small-Signal Stability.

**Palavras-chaves:** Segurança de Sistemas de Potência; Regiões de Segurança Dinâmica; Estabilizadores de Sistemas de Potência; Enxame de Partículas; Estabilidade a Pequenas Perturbações.

---

## 1. INTRODUÇÃO

A análise da segurança dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) por meio de Regiões de Segurança (RS) têm sido objeto de investigação de vários trabalhos na literatura (Morison et al., 2004). Estas são gráficos tridimensionais que permitem a avaliação da capacidade de transferência de potência entre três grupos de geração do sistema (Almeida et al., 2013; Parreiras et al., 2017). Dessa forma, tem-se uma visualização da distância entre o ponto de operação atual e os limites de segurança. Para facilitar a análise, gráficos bidimensionais denominados nomogramas são utilizados (que são projeções das RS).

As RS Estáticas (RSE) apresentam as regiões seguras em que as seguintes restrições são satisfeitas no caso base e em contingências: tensões nodais, gerações de potência ativa e reativa, carregamento dos circuitos e convergência do fluxo de potência (Almeida et al., 2013). O método convencional de cálculo das RS é baseado em direções de transferência de geração radiais com origem no ponto de operação atual. Ressalta-se que as RSE serão tão precisas quanto menor for o

passo de transferência de potência utilizado. Considerando que uma execução de fluxo de potência é realizada em cada passo (e em cada direção), a construção destas regiões requer um esforço computacional considerável (Almeida et al., 2013).

Além da análise de segurança estática, a segurança dinâmica dos SEP deve ser avaliada. Nesse contexto se insere a análise da estabilidade a pequenas perturbações, focada no estudo das oscilações eletromecânicas de baixa frequência.

Essas oscilações se originam a partir do desbalanço entre os torques elétrico e mecânico nos geradores síncronos após a ocorrência de distúrbios. Caso não sejam amortecidas, estas podem gerar desgastes mecânicos nas unidades geradoras, limitar a potência transferida entre áreas e causar blecautes (Pal & Chaudhuri 2005).

A natureza dessas oscilações está associada à frequência de oscilação, podendo ser: (i) local, (ii) interarea, (iii) intraplanta, etc. As oscilações locais possuem uma frequência na faixa de 1-3 Hz e correspondem à oscilação de um gerador contra o resto do sistema. Por outro lado, as oscilações interarea possuem uma frequência na faixa de 0,3 a 0,7 Hz e correspondem à oscilação entre geradores de diferentes áreas do sistema elétrico (Kundur 1994). Uma das formas de

avaliação da estabilidade a pequenas perturbações consiste em verificar se o coeficiente de amortecimento dos modos de oscilação é positivo, o que indica que os autovalores da matriz de espaço de estados em malha fechada estão no lado esquerdo do plano complexo.

Visando amortecer as oscilações, Demello e Concórdia propuseram, no início da década de setenta, o uso de um controlador denominado de Estabilizador de Sistema de Potência (ESP) (Demello & Concordia 1969). Compostos por estágios de compensação de fase e de ganho, os ESPs possuem a função de modular a tensão de referência do sistema de excitação para amortecer as oscilações eletromecânicas.

A análise da segurança dinâmica à pequenas perturbações pode ser feita pelas Regiões de Segurança Dinâmica (RSD) em que a região segura garante coeficientes de amortecimento mínimos (Parreiras et al., 2017). O processo convencional para a obtenção das RSD é similar ao das RSE, diferindo somente no fato de que, além de uma execução do fluxo de potência para cada passo de transferência de potência, realiza-se também uma análise modal para cálculo dos autovalores e seus respectivos coeficientes de amortecimento. Logo, o esforço para obtenção das RSD é maior do que para a obtenção da RSE.

A redução do tempo computacional foi obtida na literatura a partir da aplicação de técnicas de cálculo parciais de autovalores durante as análises modais (Parreiras et al., 2017). As RSD também já foram utilizadas para avaliação da segurança em sistemas com elos multi-terminais de corrente contínua (Assis et al., 2017).

Visando a redução do esforço computacional na construção das RSE, a aplicação da técnica de otimização *Particle Swarm Optimization* (PSO) foi investigada na literatura (Tinoco et al., 2021). O método PSO também foi aplicado para a construção das RSD, permitindo uma redução de até 95% do tempo computacional (comparado com a metodologia convencional) e mantendo a precisão (Carvalho et al., 2022).

O presente trabalho visa analisar o impacto do reajuste de estabilizadores de sistemas de potência no formato da RSD do sistema *New England*. A metodologia baseada no uso do PSO proposta por Carvalho et al. (2022) é utilizada devido ao ganho computacional permitido.

## 2. MODELAGEM PARA ESTUDO DA ESTABILIDADE A PEQUENAS PERTURBAÇÕES

### 2.1 Modelagem em Espaço de Estados

Para a análise da estabilidade a pequenas perturbações, o SEP é modelado em espaço de estados (no domínio do tempo). Para isso, as equações que descrevem o comportamento dinâmico do sistema são linearizadas em torno de um ponto de operação  $j$ , conforme descrito em (1).

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x} &= A_j \Delta x + B_j \Delta u \\ \Delta y &= C_j \Delta x + D_j \Delta u \end{aligned} \quad (1)$$

em que  $\Delta x$  são as variáveis de estado (velocidade das máquinas, ângulos, tensões de campo e variáveis dos controladores),  $\Delta u$  representa as variáveis de entrada (tais como os sinais de controle: tensão de referência dos

reguladores de tensão) e  $\Delta y$  são as variáveis de saída (como a velocidade terminal das máquinas). As matrizes em uma condição operativa  $j$  são: estados ( $A_j$ ), entrada ( $B_j$ ), saída ( $C_j$ ) e transmissão direta ( $D_j$ ).

Em malha aberta os geradores possuem somente os reguladores automáticos de tensão. Portanto, o sistema não possui estabilizadores. A estrutura das matrizes da formulação em espaço de estados para o problema em questão, pode ser obtida na literatura (Peres et al., 2021; Sauer & Pai, 1998).

A cada autovalor da matriz de estados em malha fechada ( $n \times n$ ) está associado um coeficiente de amortecimento  $\xi_k$  ( $k = 1, \dots, n$ ). Ao menor coeficiente de amortecimento denomina-se coeficiente de amortecimento mínimo  $\xi$ : o sistema será estável em malha fechada se  $\xi > 0$ .

### 2.2 Estabilizadores de Sistemas de Potência

Os ESPs modulam a tensão de referência do sistema de excitação para amortecer as oscilações eletromecânicas. Estes são controladores locais instalados em cada gerador síncrono  $p$  dos SEP e podem ser representados pela função de transferência dada em (2).

$$ESP_p(s) = K_p \cdot \frac{(s \cdot T_w)}{(1 + s \cdot T_w)} \cdot \frac{\left(1 + s \frac{\sqrt{\alpha_p}}{\omega_p}\right)^{nb}}{\left(1 + s \frac{1}{\omega_p \cdot \sqrt{\alpha_p}}\right)^{nb}} \quad (2)$$

em que  $T_w$  é a constante de tempo do filtro *washout*, usado para que o estabilizador atue somente no regime transitório (essa constante é conhecida) e  $nb$  é o número de compensadores de atraso e/ou avanço utilizados (parâmetro também conhecido). Os parâmetros a serem ajustados para o controlador são: o ganho  $K_p$ , o parâmetro de compensação de fase  $\alpha_p$  e a frequência onde ocorre a máxima compensação de fase  $\omega_p$ .

### 2.3 Ajuste Ótimo de ESP

O principal objetivo desse trabalho é investigar o impacto do reajuste dos ESPs no formato da região de segurança. Dessa forma, inicialmente obtém-se a RSD considerando um ajuste inicial para os ESPs do sistema *New England*. Em seguida, otimiza-se os parâmetros dos ESPs para a maximização do coeficiente de amortecimento mínimo em malha fechada  $\xi$ . Considerando o reajuste, o algoritmo para a construção da RSD é executado novamente e comparado com a RSD obtida para os valores iniciais dos ESPs. A formulação do problema de otimização é apresentada em (3).

$$\begin{cases} \text{Max} & \xi \\ \text{s. a.} & K_p \min \leq K_p \leq K_p \max \\ & \alpha_p \min \leq \alpha_p \leq \alpha_p \max \\ & \omega_p \min \leq \omega_p \leq \omega_p \max \end{cases} \quad (3)$$

em que as restrições de canalização representam o espaço de busca considerando os limites dos parâmetros a serem ajustados para cada estabilizador.

### 3. FUNDAMENTOS DE REGIÕES DE SEGURANÇA

#### 3.1 Definição

A RS é um gráfico tridimensional construído a partir de um ponto de operação que permite avaliar diferentes cenários de despacho em um sistema composto por três grupos de geração. Na Fig. 1 ilustra-se uma RS genérica tridimensional na qual identifica-se: a região de operação segura (em que todas as restrições físicas e operacionais são atendidas), o limite de segurança (que define a região segura) e a região de operação insegura (na qual ao menos um limite é violado). Para facilitar a análise, constrói-se gráficos denominados nomogramas, que são projeções bidimensionais (planos G1xG2, G1xG3 e G2xG3) (Almeida et al., 2013). É importante acrescentar que:

i. mais de três grupos geração poderiam ser considerados na análise. Entretanto, nesse caso, a RS não seria atrativa do ponto de vista prático (Tinoco et al., 2021);

ii. na denominada RSE são considerados limites estáticos tais como: tensão nodal, geração de potência reativa, capacidade de geração de potência ativa dos grupos, capacidade térmica dos circuitos e contingência (Almeida et al., 2013; Tinoco et al., 2021);

iii. na denominada RSD para análise da segurança à pequenas perturbações (objeto de estudo desse trabalho), são considerados os limites: capacidade de geração de potência ativa dos grupos e diferentes faixas de coeficientes de amortecimentos associados aos modos de oscilação do sistema (Parreiras et al., 2017).

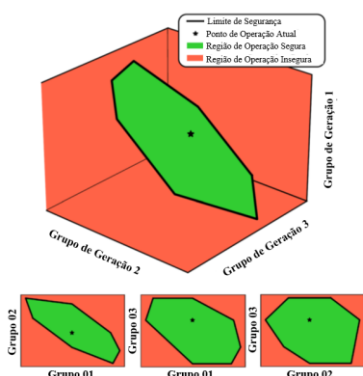


Fig. 1 Região de segurança genérica. Adaptado de (F. M. Tavela et al., 2022).

#### 3.2 Processo de Construção Convencional da RS

O processo de construção detalhado em (Almeida et al., 2013) é válido tanto para a construção da RSE quanto da RSD, e pode ser sintetizado nos seguintes passos:

1. Divisão do sistema em três grupos de geração;
2. Determinação dos limites e direções de busca;
3. Determinação das regiões exportadoras (EXP) e importadoras (IMP);

4. Determinação dos fatores de participação de grupo e individuais;
5. Aplicação da ferramenta de cálculo da máxima transferência de potência entre áreas.

#### 3.3 Divisão do Sistema em Três Grupos de Geração

Um grupo pode ser composto por um ou mais geradores e diferentes estratégias podem ser utilizadas para a divisão do sistema. Por exemplo, a RS pode ser utilizada para a quantificação da penetração de energia eólica em sistemas de transmissão (nesse caso um dos grupos representa um parque eólico) (Alves et al., 2018). Ressalta-se que a carga é mantida constante no processo de construção da RS.

#### 3.4 Determinação dos Limites e Direções de Busca

O conceito de direções de busca pode ser entendido a partir da Fig. 2. Partindo-se do ponto de operação inicial, define-se direções radiais (na figura tem-se 6 direções iniciando-se em um ângulo de 45°). O quadrante no qual uma direção de transferência está localizada é importante para a definição das regiões (IMP e EXP) e para o cálculo dos fatores de participação de grupo. Um dos grupos (denominado grupo de balanço) deverá suprir a variação das perdas durante o processo (grupo que possui a barra de referência do sistema).

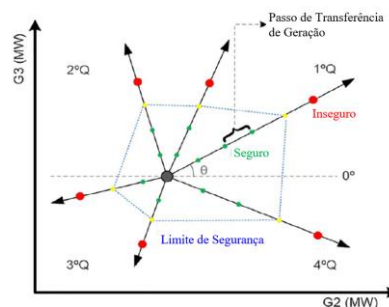


Fig. 2 Definição das direções de busca. Adaptado de (Tinoco et al., 2021).

Os limites considerados na construção da RSE são:

- i. **Tensão:** a partir desse ponto, a tensão em ao menos uma das barras viola os limites máximo ou mínimo, no ponto de operação atual ou contingências;
- ii. **Térmico:** a partir desse ponto, o carregamento máximo (MVA) em ao menos um circuito é violado no ponto de operação atual ou contingências;
- iii. **Reativo:** a partir desse ponto os limites de geração de potência reativa (máximo ou mínimo) são violados por ao menos um gerador no ponto atual ou contingências;
- iv. **Contingência:** a partir desse ponto, o fluxo de potência não converge em ao menos um dos cenários de contingência;
- v. **MW:** a partir desse ponto, o fluxo de potência no ponto de operação atual não tem solução ou um dos limites de geração dos grupos foi violado (máximo ou mínimo).

Quando todos os limites são simultaneamente satisfeitos, tem-se a Região Segura da RSE, conforme ilustrado nas Fig. 1 e 2.

Para a construção das RSD, além dos limites de MW, considera-se limites para os coeficientes de amortecimento  $\xi$  associados aos modos de oscilação do sistema em malha fechada (com os controladores tais como estabilizadores de sistemas de potência) (Parreiras et al., 2017; Peres et al., 2021). Nesse trabalho, considera-se:

- i.  $\xi \geq 5\%$ : partindo-se do ponto atual até esse ponto, o fator de amortecimento associado ao modo de oscilação dominante é igual ou superior a 5%. O interior da curva definida por esse limite é chamado de Região Segura.

Nesse trabalho, por simplicidade, fora da região segura tem-se que:

- ii. o sistema é estável porém o coeficiente de amortecimento é inferior a 5% (região não segura);
- iii. o sistema é instável dinamicamente ( $\xi < 0$ ) mas tem solução do fluxo de potência;
- iv. o fluxo de potência não convergiu ou o método de cálculo de autovalores (modos de oscilação para os quais calcula-se os fatores de amortecimento) não convergiu (Parreiras et al., 2017).

### 3.5 Determinação das Regiões Exportadoras (EXP) e Importadoras (IMP)

Para cada direção de busca deve-se definir quais as regiões atuam como Exportadora (aumentando a geração de potência) ou Importadora (reduzindo o montante de geração). No primeiro quadrante da Fig. 2 observa-se que os grupos 2 e 3 aumentam suas gerações a partir do ponto de operação atual. Nesse caso os grupos 2 e 3 compõem a região exportadora enquanto o grupo 1 atua como a região importadora (reduzindo a geração) bem como o grupo de balanço (supre as perdas). Em (Almeida et al., 2013) é realizada uma análise minuciosa para diferentes direções de busca.

### 3.6 Determinação dos Fatores de Participação de Grupo e Individuais

O processo de transferência de potência entre as regiões EXP e IMP é ilustrado na Fig. 2. Observa-se que para cada direção é feito um incremento de potência (*passo*) partindo-se do ponto de operação atual. Quando mais de um grupo compõe a região EXP ou IMP é necessário dividir a potência entre os grupos. As expressões matemáticas para o cálculo do *fator de grupo*  $FPG_i$  ( $i = 1,2,3$ ) podem ser obtidas em (F. Tabela, 2020) e o incremento de potência  $\Delta G_i$  de um grupo  $i$ , pode ser calculada conforme (4):

$$\Delta G_i = FPG_i \cdot passo \quad (4)$$

O somatório dos fatores dos grupos que compõem a região IMP deve ser igual ao somatório dos fatores do grupo EXP.

Uma vez definido o montante de incremento de potência a ser alocado em cada grupo, deve-se partilhá-lo entre todos os geradores que compõem o respectivo grupo. Para isso deve-se

calcular os fatores de participação individuais de cada gerador  $j$  que compõe o grupo  $i$  ( $FPI_j^i$ ). Neste trabalho os fatores individuais são calculados com base na capacidade máxima de geração de cada grupo, conforme (5).

$$FPI_j^i = \frac{P_{Gj}^{max}}{\sum_{k \in \Omega_i} P_{Gk}^{max}} \quad (5)$$

sendo  $P_{Gj}^{max}$  o limite máximo de potência ativa do gerador  $j$  e  $\Omega_i$  o conjunto de geradores que compõem o grupo  $i$ . A equação (6) apresenta o cálculo do incremento de potência de um gerador  $j$  de um grupo  $i$ . A atualização da potência gerada é realizada em (7) para todos as unidades do sistema, sendo que a potência gerada pela barra de referência (barras  $V\theta$  presente no grupo 1) deverá ser atualizada após a solução do fluxo de potência devido às perdas.

$$\Delta P_{Gj} = FPI_j^i \cdot \Delta G_i \quad (6)$$

$$P_{Gj} = P_{Gj}^0 + \Delta P_{Gj} \quad (7)$$

em que  $P_{Gj}^0$  é a potência no ponto de operação inicial.

### 3.7 Ferramenta para o Cálculo da Máxima Transferência de Potência

Conforme ilustrado na Fig. 2, para a construção da RSE (região segura nas Fig. 1 e 2), partindo-se do ponto de operação inicial, faz-se sucessivas atualizações de potência para cada direção conforme (7). Para cada novo ponto, o fluxo de potência (via o método de Newton-Raphson) é executado e o processo é encerrado em uma dada direção quando um dos limites estáticos é violado (MW, tensão, térmico, reativo ou contingência). Ressalta-se que esse é um processo simplificado onde somente a região segura é calculada. Outras curvas (limites estáticos individuais) também podem ser exibidas conforme apresentado em (Almeida et al., 2013).

No caso da RSD, após a solução do fluxo de potência em cada ponto atualizado (vide Fig. 2), é realizada a análise modal via o método QR (Francis, 1961) para análise dos coeficientes de amortecimento (caso o fluxo de potência convirja). O processo é terminado quando os limites de MW ou de faixa de amortecimento ( $\xi \leq 5\%$ ) são alcançados (Parreiras et al., 2017).

Uma vez definidos os pontos de máxima transferência de potência em cada direção, estes são interligados para construção da RSE ou RSD.

## 4. METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DA RSD VIA PSO

Na seção anterior a metodologia convencional para obtenção da RSD foi apresentada. Tal metodologia é baseada em passos de transferência de potência e a precisão das RSD será maior tanto quanto menor forem tais passos (o que eleva o esforço computacional). Em Tinoco et al. (2021) a técnica de otimização PSO foi empregada para a obtenção das RSE com uma redução do esforço computacional e precisão satisfatória. Em Carvalho et al. (2022) o PSO foi aplicado com sucesso na obtenção das RSD. A principal vantagem é que as partículas do PSO são livres para se deslocarem no espaço de busca

(região factível definida pelos limites de geração) sem a necessidade da especificação das direções e dos passos de transferência de potência. Ressalta-se que visa-se encontrar vários pontos de máxima transferência que permitam mapear a região segura: uma metaheurística (como o algoritmo genético, ou o próprio PSO considerando a parcela social) que busca um único ótimo global, não seria interessante. Considerando as partículas alocadas em quatro quadrantes, a busca pelo ótimo global em cada quadrante faria com que a RSD fosse um losango.

#### 4.1 Definição das Variáveis

Considerando o primeiro grupo gerador ( $G_1$ ) como o de balanço, as variáveis de otimização da metodologia proposta são as gerações dos demais grupos:  $G_2$  e  $G_3$ .

#### 4.2 Modelo de Otimização Proposto

O modelo de otimização proposto para construção da RSD é apresentado em (8).

$$\begin{aligned} \text{Max.} \quad & Z = \sqrt{(\Delta G_2)^2 + (\Delta G_3)^2} & (8a) \\ \text{s. a.} \quad & G_2^{\min} \leq G_2 \leq G_2^{\max} & (8b) \\ & G_3^{\min} \leq G_3 \leq G_3^{\max} & (8c) \\ & \xi \geq \xi^d & (8d) \end{aligned}$$

em que  $\Delta G_2$  e  $\Delta G_3$  denotam a distância do limite da curva (que define a região segura) e o ponto de operação inicial. O termo  $\xi^d$  é o fator de amortecimento desejado que limita a região segura (nesse trabalho  $\xi^d = 5\%$ ).

A Fig. 3 ilustra o cálculo da função objetivo em que a população do PSO (partículas) deverá mapear a região segura. A função aptidão de cada partícula será a distância entre o ponto de operação inicial ( $G_2^0, G_3^0$ ) e a distância a ser maximizada destas no plano  $G_2 \times G_3$  ( $d_c$  por exemplo para a partícula  $c$ ).

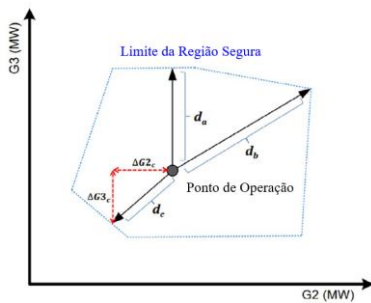


Fig. 3 Ilustração do cálculo da função objetivo. Adaptado de Tinoco et al. (2021).

#### 4.3 Particle Swarm Optimization (PSO)

O método de Otimização baseado em Enxames de Partículas (PSO) (Kennedy & Eberhart, 1995) baseia-se no comportamento social de bandos de pássaros na busca por alimentos. Os indivíduos (pássaros) da população (bando) se movimentam no espaço sofrendo influência das suas melhores experiências anteriores (fator cognitivo) e das melhores experiências de suas vizinhas (fator social).

Nesse trabalho, segue-se a estratégia proposta por Tinoco et al. (2021), em que a experiência social é desprezada. Conforme ilustrado na Fig. 4, a tendência é que cada partícula se desloque em relação a sua melhor experiência individual. No final do processo, as posições destas serão utilizadas para mapear os limites da região de segurança.

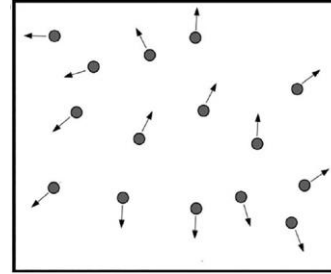


Fig. 4 Comportamento das partículas na ausência do fator social. Adaptado de Tinoco et al. (2021).

Em uma determinada iteração (geração)  $k$ , a cada partícula  $i$  está associada: (i) uma velocidade  $v_i^k$ , (ii) uma posição  $x_i^k$  e (iii) uma memória da sua melhor posição durante o processo de busca  $pbest_i$  (fator cognitivo). Essas grandezas são vetores bidimensionais (mesma dimensão do espaço de busca: as gerações dos grupos 2 e 3). As equações (9)-(11) governam o movimento das partículas durante o processo de otimização.

$$v_i^{k+1} = w^k \cdot v_i^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_i - x_i^k) \quad (9)$$

$$w^k = w_{max} - \left( \frac{w_{max} - w_{min}}{k_{max}} \right) \cdot k \quad (10)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (11)$$

em que  $c_1$  é uma constante de aceleração positiva (igual a 2),  $r_1$  é um número randômico,  $w^k$  é a constante de inércia na geração  $k$  que controla a capacidade de busca do método (esta sofre um decréscimo de  $w_{max} = 1,5$  até  $w_{min} = 0,6$ ) e  $k_{max}$  é o número de gerações. A velocidade (nesse trabalho) é limitada empiricamente entre  $[-325, 325]$ : tais limites dependem do sistema e são definidos com base na capacidade máxima de geração dos grupos. As posições (vetor de soluções em (9)) são limitadas de acordo com (8b)-(8c). Quando ocorrem violações, as variáveis são colocadas em seus limites violados. O algoritmo do PSO pode ser obtido em (Kennedy & Eberhart, 1995).

#### 4.4 Avaliação da Função Aptidão

Como anteriormente mencionado, as variáveis do problema proposto são as gerações dos grupos 2 e 3. Assim, a posição de uma partícula  $i$  na iteração  $k$  (vetor solução) será dada por (12).

$$x_i^k = [G_2^k \quad G_3^k] \quad (12)$$

A geração do grupo de balanço pode ser estimada conforme (13):

$$G_1^k = P_L - G_2^k - G_3^k \quad (13)$$

em que  $P_L$  é o somatório das demandas de potência ativa do sistema. Os incrementos de geração de potência são dados conforme (14):

$$\Delta G_i^k = G_i^k - G_i^0 \quad i = \{1,2,3\} \quad (14)$$

em que  $G_i^k$  é a geração do grupo  $i$  na iteração  $k$  e  $G_i^0$  é a geração no ponto de operação inicial. Calculados os incrementos de cada grupo, procede-se com a divisão destes entre as unidades individuais conforme (6) e atualiza-se as potências individuais em (7).

É importante ressaltar que após a atualização da potência, o fluxo de potência será executado para a atualização geração da barra *swing* (interna ao grupo 1) que contabilizará as perdas de potência do sistema. Assim sendo, a geração correta do grupo 1 será dada conforme por (15):

$$G_1^k = P_L - G_2^k - G_3^k + P_{Perdas}^k \quad (15)$$

em que  $P_{Perdas}^k$  representa as perdas na iteração  $k$ . Observa-se que a carga é mantida constante. Adicionalmente, como o objetivo é construir a RSD para análise da segurança à pequenas perturbações, procede-se com a análise modal do sistema de potência após a convergência do fluxo de potência. O modelo dinâmico da rede é o mesmo utilizado na literatura especializada (Peres et al., 2021; Sauer & Pai, 1998).

Durante o processo iterativo é necessário calcular a função aptidão (*fitness*)  $fit_i^k$  de cada partícula. Os limites dos grupos 2 e 3 (equações (8b) e (8c)) são tratados intrinsecamente pelo PSO. Para o tratamento da restrição (8d), que define a região de segurança, é necessário adotar um esquema de penalização conforme (16).

$$fit_i^k = \sqrt{(\Delta G_2^k)^2 + (\Delta G_3^k)^2} - \mu \cdot L_V \quad (16)$$

em que adotou-se  $L_V = 10^{10}$ . O coeficiente de penalização  $\mu$  assume o valor zero (0) quando  $\xi$  for maior que 5% e quando a geração do grupo 1 estiver dentro dos seus limites de capacidade. Na ocorrência de qualquer violação ( $\xi \leq 5\%$  e geração do grupo 1 fora dos limites),  $\mu$  recebe o valor 1, indicando que a partícula em questão deve ser penalizada por estar fora dos limites de segurança. Em Tinoco et al. (2021) para a obtenção da região segura da RSE e em Carvalho et al. (2022) para a obtenção da RSD,  $\mu$  recebe o valor unitário quando qualquer restrição é violada. Ressalta-se que as partículas são divididas proporcionalmente entre os quadrantes da Fig. 2 (25% da população por quadrante) e não podem deixá-los com o objetivo de mapear corretamente a RSD. A população inicial segue essa mesma divisão (limitada a 20% ao redor do caso base). Por fim, a posição das partículas ao final das iterações é fornecida ao comando *boundary* do Matlab que delinea a RSD de forma correta.

Em Parreiras et al. (2017) são construídas duas RSD distintas: uma para o caso base (ponto de operação atual) e uma para um conjunto de contingências pré-selecionadas. Nesse trabalho introdutório constrói-se somente a RSD do caso base.

## 5. ESTUDO DE CASO

### 5.1 Descrição do Sistema

O sistema *New England* (bastante utilizado na análise de dinâmica de sistemas elétricos) ilustrado na Fig. 5 é utilizado neste trabalho seguindo a divisão de grupos proposta na

literatura (F. M. Tavela et al., 2022). Os dados estáticos (barra, linhas e limites de geração) podem ser obtidos em (F. Tavela, 2020) e os dados dinâmicos podem ser obtidos em (Peres et al., 2021). A metodologia baseada no PSO para construção das RSD foi executada considerando 56 partículas e 25 gerações (Carvalho et al., 2022). No ponto de operação base (ponto inicial usado para construir as regiões de segurança) tem-se a solução da Tabela 1. O coeficiente de amortecimento é igual a 6,36%. Os valores individuais de gerações são apresentados em (F. Tavela, 2020).

Tabela 1. Valores de geração (MW)

--	$G_1$	$G_2$	$G_3$
Base	4514	2363,2	1210
Mínimo	0	0	0
Máximo	6000	4000	2000

As simulações são realizadas no Matlab em um computador Intel Core i7 1.80 GHz com 16GB de RAM e sistema operacional Windows 10, 64 bits. A avaliação dos ganhos de tempo computacional foi anteriormente apresentada em Carvalho et al. (2022) e será omitida no presente trabalho. Em Tinoco et al. (2021) é apresentada uma análise estatística do PSO, mostrando a boa capacidade deste em apresentar RSE para diferentes execuções (haja vista sua característica randômica). Tal análise será omitida aqui por questões de espaço.

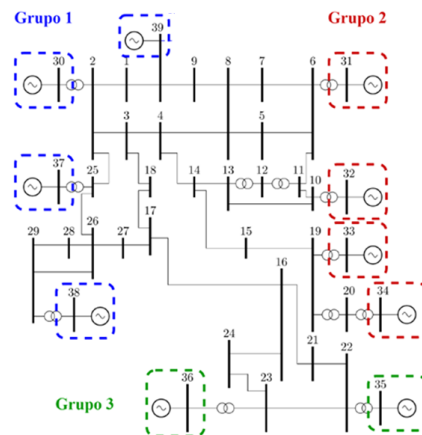


Fig. 5 Sistema *New England*. Fonte: (F. M. Tavela et al., 2022).

### 5.2 Impacto do Ajuste dos ESPs no Caso Base

A Tabela 2 apresenta as gerações individuais dos grupos no caso base e os coeficientes de amortecimento antes (6,36%) e após o reajuste dos ESPs (9,19%). Observa-se que o método de otimização forneceu um bom amortecimento para o caso base.

Tabela 2. Gerações e amortecimento no caso base

$G_1$ (MW)	$G_2$ (MW)	$G_3$ (MW)	$\xi$ (%) Orig.	$\xi$ (%) Reaj.
4514	2363,2	1210	6,36	9,19

A Tabela 3 apresenta os parâmetros originais dos ESPs (Peres et al., 2021) e os parâmetros otimizados pela metodologia descrita na Seção 2.3. Para o ajuste, o PSO tradicional (que



considera as influências cognitivas e sociais) foi empregado utilizando 56 partículas e 50 gerações. As seguintes constantes são associadas aos ESPs:  $T_w = 5$  seg e  $nb = 2$ . Os limites das variáveis são dados por (17). O gerador da barra 39 não possui ESP por se tratar de um equivalente de rede.

$$\begin{aligned} 0,01 &\leq K_p \leq 40,00 \\ 0,10 &\leq \alpha_p \leq 10,00 \\ 1,25 &\leq \omega_p \leq 30,00 \end{aligned} \quad (17)$$

Tabela 3. Parâmetros dos ESPs

GER	Original			Reajustado		
	$K_p$	$\alpha$	$\omega$	$K_p$	$\alpha$	$\omega$
30	32,58	9,98	12,58	35,47	9,61	7,56
31	33,42	9,97	13,61	21,67	8,11	8,98
32	29,22	9,97	20,76	22,14	9,93	23,07
33	20,38	8,07	27,94	39,20	9,01	28,20
34	20,00	9,90	25,91	35,68	9,45	11,53
35	20,68	6,56	28,55	30,25	8,96	6,38
36	23,77	9,42	26,86	25,43	9,16	15,48
37	29,23	9,97	13,75	37,86	9,34	8,58
38	21,85	2,39	28,48	33,98	8,51	19,94
39	--	--	--	--	--	--

### 5.3 Comparação das RSD para Diferentes Ajustes para os ESPs

As Fig. 6 a 8 apresentam os nomogramas da RSD dinâmica nos três planos. Para facilitar a análise, os resultados para ambos os ajustes foram plotados nos mesmos gráficos:

- a região segura da RSE é hachurada em verde; corresponde a RS construída considerando os limites estáticos;
- a RSD considerando os ESPs originais possui sua região segura limitada em preto; pontos de operação no interior dessa região possuem coeficientes de amortecimento superior a 5%;
- a RSD considerando os ESPs otimizados possui sua região segura limitada em amarelo; pontos de operação no interior dessa região possuem coeficientes de amortecimento superior a 5%.

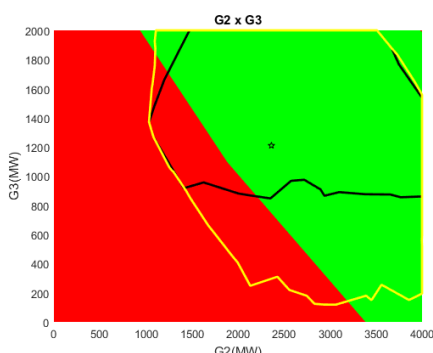


Fig. 6 Nomograma no plano G2xG3 da RSD.

Analisando a Fig. 6, observa-se que o reajuste dos ESPs permitiu uma expansão da RSD: a região segura delimitada em amarelo é maior que a região segura delimitada em preto. Além disso, quando se considera os ESPs originais, grande parte dos pontos factíveis na RSE não são seguros do ponto de vista da RSD. Logo, o reajuste dos ESP permite que mais

cenários de despacho que satisfazem os critérios de segurança dinâmica possam ser escolhidos.

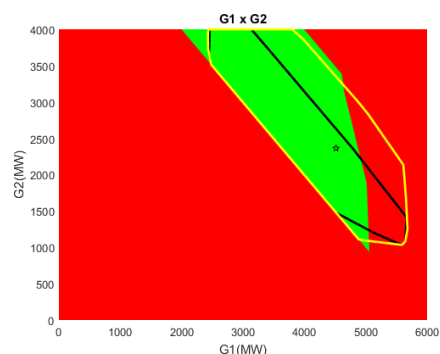


Fig. 7 Nomogramas no plano G1xG2 da RSD.

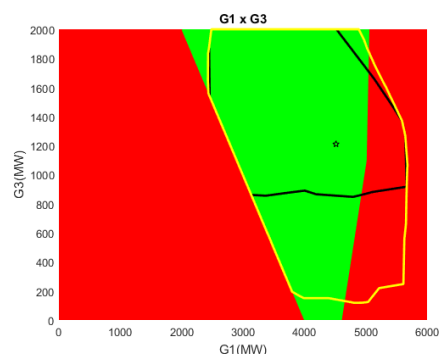


Fig. 8 Nomogramas no plano G1xG3 da RSD.

### 5.4 Redespacho dos Grupos de Geração

Um dos propósitos da RSD é fornecer visualmente cenários de redespacho de geração que atendam critérios de segurança a pequenas perturbações. A Tabela 4 apresenta dois pontos factíveis do ponto de vista da RSE, comparando-os com o caso base. O que difere os dois pontos é se o cenário de redespacho está interno (ponto 1) ou externo (ponto 2) à região segura quando se utiliza os ESPs originais (limitada em preto na Fig. 6). É possível observar que os coeficientes de amortecimento se comportam como esperado: um valor inferior a 5% é obtido no ponto 2 para o caso dos ESPs originais. Para a situação de reajuste, esse valor é em torno de 9,2%. Além disso, o ponto 1 operando com os ESPs otimizados fornece um amortecimento maior que o do caso base. Isso se deve à característica não linear do sistema: diferentes cenários excitam os modos de oscilação locais e interarea de forma distinta.

Tabela 4. Gerações e amortecimento no caso base

Ponto	$G_1$ (MW)	$G_2$ (MW)	$G_3$ (MW)	$\xi$ (%) Orig.	$\xi$ (%) Reaj.
1	3955,1	3000	1100	6,32	10,03
2	4474	3000	600	3,15	9,59
Base	4514	2363,2	1210	6,36	9,19

### 5.5 Validação não Linear

Apesar do problema abordado nesse artigo estar associado a estabilidade a pequenas perturbações, quando o operador

escolhe um cenário de despacho a partir das RSE e RSD, este ponto deve ser validado no contexto das grandes perturbações (estabilidade angular transitória). O pior caso da Tabela 4 (amortecimento de 3,15%) é selecionado para a validação.

Como grande perturbação aplica-se um curto-circuito na barra 11 por 50ms o qual é eliminado a partir da abertura do circuito 10-11. O circuito é religado após 50ms. A Fig. 9 apresenta a variação do ângulo interno de alguns geradores em relação ao ângulo da barra de referência (gerador 39). Observa-se que o ponto escolhido também é viável do ponto de vista da estabilidade angular transitória.

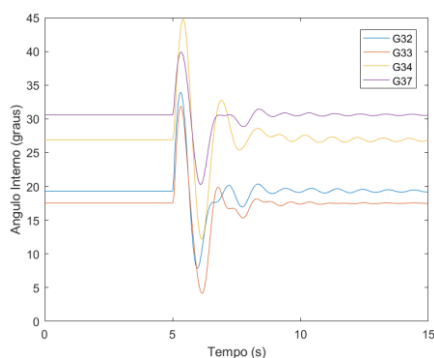


Fig. 9 Resposta no domínio do tempo.

## 6. CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou o impacto do reajuste dos estabilizadores de sistemas de potência nas Regiões de Segurança Dinâmica. Estas são ferramentas gráficas que permitem avaliar a distância do ponto de operação atual em relação aos limites de segurança (definidos por coeficientes de amortecimento dos modos de oscilação eletromecânicos). Para a obtenção das regiões, utilizou-se uma metodologia previamente proposta pelos autores baseada na técnica PSO.

A principal observação é que o reajuste de estabilizadores é benéfico para o aumento da região de segurança, o que é de interesse do operador do sistema elétrico. Os próximos passos focarão na investigação do comportamento dos diferentes tipos de modos de oscilação nos pontos de operação factíveis da RSD.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG, CAPES (Finance Code 001), CNPq e PPGEL (UFSJ/CEFET-MG) pelo auxílio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- Almeida, F. C. B., Passos Filho, J. A., Pereira, J. L. R., Henriques, R. M., & 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*, 24(1–2), 148–161. <https://doi.org/10.1007/s40313-013-0020-7>
- Alves, F. R. M. ., Almeida, L.P.; Fernandes, R.P.; Passos Filho, J.A.; Lirio, F. L. ., Henriques, R. M. ., La Gatta, P. O. ., & Gomes Junior, S. (2018). Using a Static and Dynamic

Security Assessment Tool to Evaluate the Effects of Increasing Wind Power Penetration in Future Operating Conditions of the Brazilian Interconnected Power System. *Eletroevolução*, 91, 61–68.

- Assis, T. M. L., Kuenzel, S., & Pal, B. C. (2017). Impact of Multi-terminal HVDC Grids on Enhancing Dynamic Power Transfer Capability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(4), 2652–2662. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2617399>

Carvalho, V. F., Peres, W., & Passos Filho, J. A. (2022). Aplicação do Método Particle Swarm Optimization na Obtenção de Nomogramas para a Avaliação da Segurança Dinâmica. *IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*.

Francis, J. G. F. (1961). The QR Transformation A Unitary Analogue to the LR Transformation--Part 1. *The Computer Journal*, 4(3), 265–271. <https://doi.org/10.1093/comjnl/4.3.265>

Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference On*, 4, 1942–1948 vols.4–1948 4.

Morison, K., Wang, L., & Kundur, P. (2004). Power system security assessment. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2(5), 30–39. <https://doi.org/10.1109/MPAE.2004.1338120>

Parreiras, T. J. M. A., Gomes Junior, S., & Taranto, G. N. (2017). Damping Nomogram Method for Small-Signal Security Assessment of Power Systems. *IEEE Latin America Transactions*, 15(5), 877–883. <https://doi.org/10.1109/TLA.2017.7910201>

Peres, W., Passos Filho, J. A., Coelho, F. C. R., Poubel, R. P. B., & Costa, J. N. N. (2021). Dynamic transmission capability calculation using bioinspired optimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 133, 107227. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107227>

Sauer, P., & Pai, M. A. (1998). *Power system dynamics and stability* (1st ed.). Prentice Hall.

Tavela, F. (2020). *Desenvolvimento de Técnicas Avançadas para Construção de Regiões de Segurança Estática*. Universidade Federal de Juiz de Fora.

Tavela, F. M., Filho, J. A. P., & 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*. <https://doi.org/10.1007/s40313-021-00870-2>

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