



Grupo de Estudo de Operação de Sistemas Elétricos - GOP

**AVALIAÇÃO DA PENETRAÇÃO DE GERAÇÃO EÓLICA A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE
REGIÕES DE SEGURANÇA ESTÁTICA**

RICARDO MOTA HENRIQUES (*)
UFJF

JOÃO ALBERTO PASSOS FILHO
UFJF

RANIELLI VIEIRA POMBO
UFJF

TOBIAS LUIS MAURO BARATA
UFJF

RODRIGO DIAS
PETROBRAS

FLÁVIO RODRIGO DE M. ALVES
CEPEL

RESUMO

O crescimento de um sistema elétrico de potência para atender ao aumento da demanda implica na operação mais próxima dos limites e na expansão da oferta de energia. O Sistema Interligado Nacional Brasileiro vem expandindo a participação das fontes de energia renováveis. É necessário um planejamento rigoroso para maximizar a energia armazenada nos reservatórios e resguardar a segurança operativa. Este trabalho tem por objetivo usar a região de segurança estática na avaliação de cenários com geração eólica. A estrutura do estudo consiste em avaliar a máxima capacidade que as barras candidatas tem de escoar a potência ativa destas fontes.

PALAVRAS-CHAVE

Geração Eólica, Região de Segurança Estática, Análise de Segurança

1.0 - INTRODUÇÃO

O crescimento dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP's) para atender ao aumento da demanda de energia elétrica e a desverticalização das empresas de energia elétrica em todo o mundo ao longo das últimas décadas resultou na operação destes sistemas cada vez mais próximos de seus limites físicos e operacionais (1). No caso específico do Sistema Interligado Nacional Brasileiro (SIN), a coordenação da operação hidrotérmica permite ganhos energéticos importantes e a redução dos investimentos, em função da complementaridade de regimes hidrológicos entre diferentes bacias hidrográficas (2). A multiplicidade de cenários de intercâmbio de potência ativa entre áreas, bem como de diferentes cenários de valores de injeção de potência ativa oriundos de novas fontes de energia renovável com características de intermitência e sazonalidade, exige uma nova geração de ferramentas computacionais que garantam a segurança estática e dinâmica da operação do SIN, em operação normal e para situações de emergência, tanto em estudos *off-line* quanto no ambiente de sala de controle. No entanto, o desenvolvimento deste tipo ferramenta, com módulos para avaliação da segurança transitória, avaliação da estabilidade a pequenos sinais, avaliação da segurança de tensão, dentre outras, não é uma tarefa simples (1,3).

O crescimento da participação da energia eólica no SIN tem sido notável nos últimos anos e traz novos desafios tanto para a operação quanto para o planejamento da expansão. Só em 2017 foram adicionados 2 GW de energia eólica em 79 novos parques, totalizando no mesmo ano 12,77 GW de capacidade total instalada no SIN, o que representa 8,1% de toda a geração do SIN. Na região nordeste brasileira, a geração dos parques eólicos chegou a quase 100% de toda a energia gerada em algumas condições de carga específica. O Brasil está entre os oito países com maior capacidade instalada de energia eólica no mundo (4).

O Plano Decenal de Expansão de Energia 2027 (PDE) aponta para a continuidade do crescimento da participação da energia eólica na região nordeste brasileiro, conforme demonstra a FIGURA 1, que mostra a localização dos empreendimentos eólicos *onshore* contratados nos leilões de energia (5). Quanto ao potencial brasileiro de geração de energia eólica *offshore*, estudos entre agosto de 1999 e dezembro de 2009, com resolução temporal diária, apontaram três regiões de alta magnitude de vento, com potencial de exploração da geração eólica *offshore*: (i) Sergipe e Alagoas, (ii) Rio Grande do Norte e Ceará e (iii) Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Estes estudos estimam um potencial entre 57 GW e 1.780GW, a depender da distância da costa, com especial destaque para a costa do Ceará e Rio Grande do Norte (6,7).

(*) Rua José Lourenço Kelmer, s/n – Campus Universitário – São Pedro – CEP 36.036-330 – Juiz de Fora/MG
Faculdade de Engenharia – Bloco P – Sala 4274 / Gabinete E08 – 2º andar
Tel: +55 32 2102-3495 ramal 215 – Email: ricardo.henriques@uff.edu.br

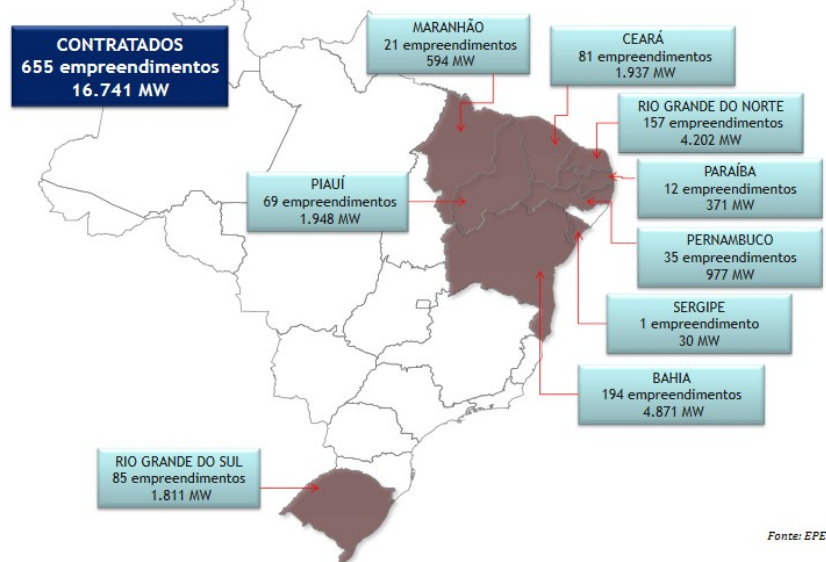


FIGURA 1 – Localização dos empreendimentos eólicos contratados nos leilões de energia (5)

Neste contexto de crescimento da geração eólica, o presente trabalho descreve os passos de um estudo realizado para classificar os melhores pontos para a injeção da potência ativa gerada por fontes eólicas, utilizando a perspectiva da avaliação de segurança estática, realizada através do levantamento de regiões de segurança, através de nomogramas. A ferramenta computacional utilizada para o levantamento da Região de Segurança Estática (RSE) é o programa ANAREDE (Eletrobras CEPEL), versão 11.2.0-Abr19, plataforma Windows. A premissa básica do estudo é explorar dentre diversas barras candidatas do SEP qual terá a maior capacidade de escoamento da nova potência injetada, observando dois quadrantes básicos do gráfico. O primeiro quadrante do plano da RSE contendo a geração existente versus a geração nova leva em consideração o aumento conjunto dos dois grupos de geração. Já o segundo quadrante tem o crescimento da geração nova, porém reduzindo a geração existente. Analisando a região segura para as barras candidatas, serão mapeados em uma dada área do SEP os pontos preferenciais para a inclusão da nova geração. Será apresentada uma revisão básica dos aspectos metodológicos e dos passos utilizados para a realização dos estudos, considerando dois sistemas: o primeiro tutorial e o segundo um SEP de grande porte baseado em um caso de referência de planejamento disponibilizado pela EPE. Com base nos resultados obtidos nestes sistemas, o desempenho do estudo será discutido.

2.0 - CONCEITOS BÁSICOS SOBRE A REGIÃO DE SEGURANÇA ESTÁTICA

Uma ferramenta SDSA (*Static and Dynamic Security Assessment*) deve efetuar a avaliação da segurança estática e dinâmica de um SEP. Esta avaliação pode ser empregada no monitoramento de um SEP em tempo-real ou em estudos *off-line* (8). Pode-se considerar que as duas principais diferenças entre SDSA *on-line* e *off-line* são a origem dos dados e os requisitos de tempo de execução. Como o foco deste trabalho está na avaliação de cenários em casos base de fluxo de potência, será utilizada a abordagem SDSA *off-line*, de caráter estático.

No caso de SDSA *off-line* (FIGURA 2) o conjunto de dados do SEP a ser avaliado é obtido de um arquivo em formato binário ou texto, onde tais dados estão representados no modelo nó-ramo, que é o modelo normalmente adotado em estudos de fluxo de potência. Os casos utilizados podem, por exemplo, representar os diferentes horizontes de planejamento da operação e da expansão normalmente utilizados para estudos do SIN. A qualidade dos resultados gerados por uma ferramenta SDSA *off-line* e a confiança de engenheiros em tomar decisões baseados nestes resultados depende da qualidade dos modelos estáticos da rede elétrica e dos equipamentos a ela conectados utilizados na avaliação de segurança do SEP.

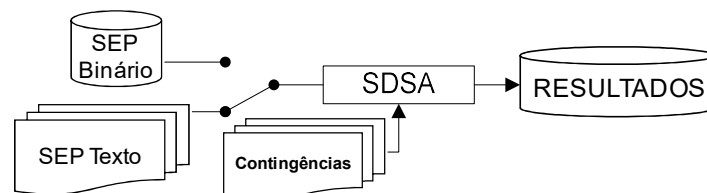


FIGURA 2 – Esquema de utilização de um sistema SDSA *off-line*

2.1 CONSTRUÇÃO E VISUALIZAÇÃO DA RSE

A análise de segurança de um SEP realizada por uma ferramenta SDSA gera uma enorme quantidade de resultados que precisam ser filtrados e sintetizados de forma adequada para que se tornem efetivamente úteis. A forma mais difundida de visualização de resultados de um SDSA é, sem dúvida, o nomograma (FIGURA 3). Um nomograma é, na verdade, a projeção ortogonal de uma região de segurança (estática ou dinâmica) sobre um dos planos que representam as possíveis direções de transferência de geração entre dois grupos de geradores ($G1 \times G2$, $G2 \times G3$ ou $G1 \times G3$). Outras formas de visualização de resultados de SDSA, tais como tabelas e mapas também são possíveis (1), mas suas características, vantagens e desvantagens não serão discutidas aqui.

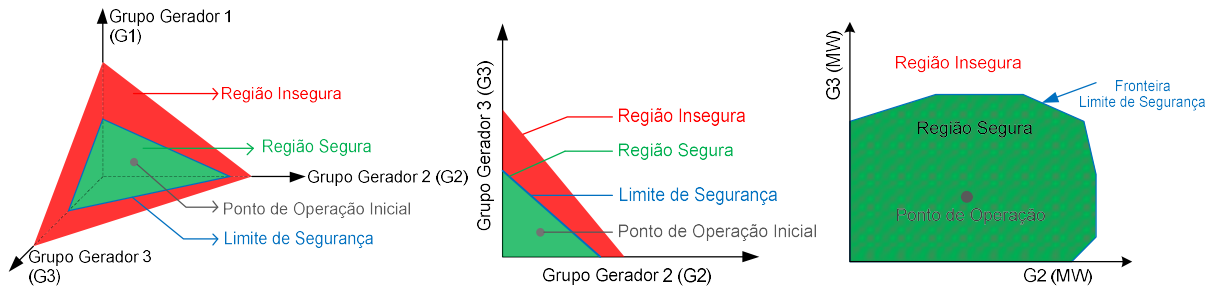


FIGURA 3 – Região de segurança (esquerda) e nomogramas (centro e direita)

2.2 ARQUITETURA DO SDSA

A base para o desenvolvimento do SDSA proposto foi a implementação no programa ANAREDE de uma função para determinação da máxima transferência de potência ativa entre dois grupos geradores. Esta implementação permite a transferência de geração ao longo de uma única direção, conforme descrito em (9,10,11). A avaliação de segurança estática foi desenvolvida a partir desta funcionalidade e começa com a divisão do SEP em três grupos de geradores (FIGURA 4), sendo G2 a região exportadora (REXP), G3 a região importadora (RIMP) e G1 o grupo de geradores “de referência”, responsável pelo fechamento do balanço entre a carga e a geração. Esta divisão permite a investigação de diversos casos de interesse no que se refere à transferência de potência ativa entre áreas (1,8).

Uma vez definidos os grupos de geradores, resta definir o número de direções de transferência de geração, o passo de transferência de geração e o montante de potência ativa que se deseja transferir da região exportadora para a região importadora. A primeira direção de transferência foi definida como 45° e as demais direções estão uniformemente distribuídas em torno de 360° . O processo de transferência de geração tem início com a modificação da geração do caso base de um valor igual ao passo de transferência de geração, seguida da verificação da convergência do fluxo de potência. Este processo é realizado automaticamente até que o montante de potência estabelecido seja transferido ou os casos deixem de convergir. Para cada ponto de operação gerado ao longo das direções de transferência de geração é efetuada uma análise de contingências utilizando uma lista de contingências pré-definida, com as contingências mais severas e/ou mais prováveis. Tanto para o ponto de operação quanto para a análise de contingências, são considerados como critérios de segurança: magnitude das tensões dos barramentos, sobrecarga em linhas de transmissão e transformadores, geração de potência reativa e convergência de casos de contingência.

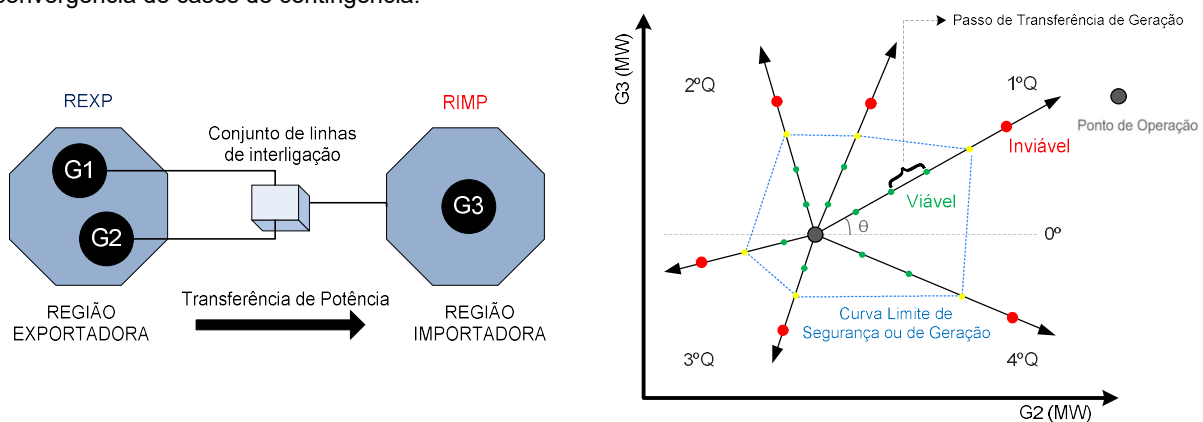


FIGURA 4 – Grupos de Geração, Direções de Transferência e Região de Segurança

A linha pontilhada na FIGURA 4 mostra uma região de segurança estática (RSE). Os pontos amarelos que delimitam esta região sobre as direções de transferência de geração representam os últimos pontos de operação

para os quais não houve violação ou o limite de transferência de geração foi atingido. Os pontos verdes, internos à região, representam pontos de operação onde nenhuma violação foi verificada e o limite de transferência de geração não foi atingido. Finalmente, os pontos vermelhos representam pontos de operação para os quais alguma violação foi verificada.

Durante a avaliação da segurança estática de cada ponto de operação através do processamento da lista de contingências, o programa ANAREDE grava arquivos de resultados que registram os critérios de segurança eventualmente violados. Ao término da execução, o Gerenciador de Resultados é acionado e trata todos os arquivos de resultados gerados durante o processo, permitindo a visualização da RSE associada ao ponto de operação base que está sendo avaliado (FIGURA 5). Estas regiões de segurança podem ser visualizadas na forma de nomogramas com o auxílio do programa VisorChart, também desenvolvido pela Eletrobras CEPREL.

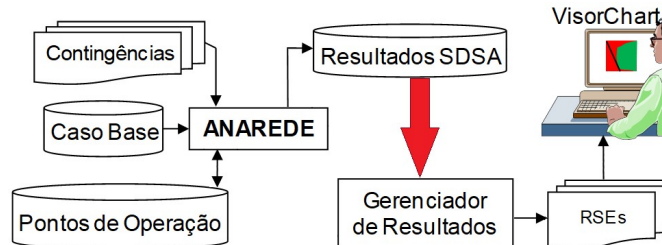


FIGURA 5 – Estrutura Básica do SDSA *off-line* ANAREDE

3.0 - APLICAÇÃO DA RSE NO PROBLEMA DE INSERÇÃO DE GERAÇÃO EÓLICA

Pelas referências (2,9,10) e pelo apresentado na seção anterior (FIGURA 4), sabe-se que a construção da RSE está alicerçada basicamente na transferência de geração entre dois grupos base de geração, G2 e G3, e que as direções de transferência de geração podem estar em um dos quatro quadrantes existentes. Cada quadrante define um comportamento típico entre os grupos de geração G2 e G3, a saber: (i) primeiro quadrante: G2 e G3 na região exportadora; (ii) segundo quadrante: G2 na região importadora e G3 na região exportadora; (iii) terceiro quadrante: G2 e G3 na região importadora; (iv) quarto quadrante: G2 na região exportadora e G3 na região importadora. Em todos os quadrantes, o grupo G1 fica responsável pelo fechamento do desbalanço entre G2 e G3, conforme a direção de transferência de geração exigir.

No caso proposto neste trabalho, deseja-se investigar como a inserção de uma nova fonte geradora, considerando uma a uma um conjunto de barras candidatas, impacta na operação segura do SEP em estudo. Neste contexto é preciso destacar que a nova fonte de geração aumenta sua injeção na barra candidata partindo de zero até o valor máximo possível em uma determinada direção de transferência de geração, considerando tanto o caso base quanto as contingências, monitorando tensões, fluxos e limites de geração de potência reativa. Logo, há uma diferença fundamental entre a avaliação tradicional e a proposta neste trabalho, que é: na avaliação tradicional os grupos de geração G2 e G3 estão ambos com valores de despacho maiores que zero para o caso base do estudo; já na avaliação proposta, apenas G2 tem valores de despacho maiores que zero (geração existente) e o grupo G3 parte sempre do despacho zero até o valor máximo definido em cada direção de transferência de geração. Se na avaliação proposta G3 parte de valores nulos de despacho, os quadrantes onde é requerida a redução do valor de G3 não existirão, que são os quadrantes onde o grupo G3 pertence à região importadora. Portanto o terceiro e quarto quadrantes, onde G3 está na região importadora e precisa reduzir seu despacho para receber potência ativa da região exportadora, não serão construídos, pois G3 já está no seu valor mínimo (zero). Esta condição particular do estudo proposto aqui está representada na FIGURA 6.

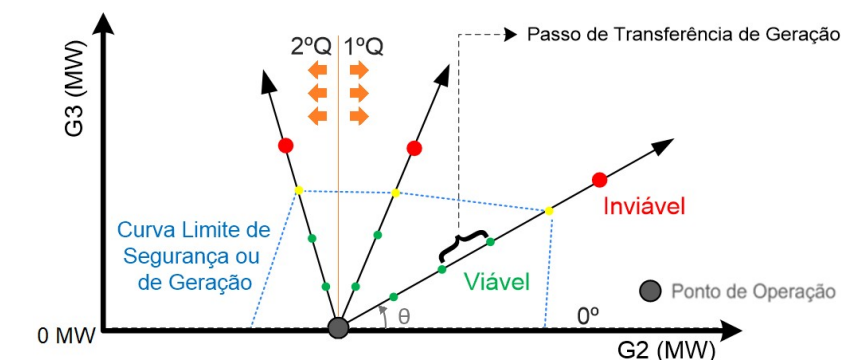


FIGURA 6 – SDSA *off-line* para avaliação da introdução de novas fontes em G3

Esta RSE para os estudos de inserção de novas fontes representada pela FIGURA 6 possui apenas dois dos quatro quadrantes da FIGURA 4 e estes dois quadrantes representam as seguintes condições: (i) primeiro quadrante: o aumento simultâneo das gerações existentes (G2 - até o seu limite operacional) e da nova geração (G3 - até o limite de convergência para o caso base e para as contingências); (ii) segundo quadrante: a redução das gerações existentes (G2 - até o seu limite operacional) e o aumento da nova geração (G3 - até o limite de convergência para o caso base e para as contingências). Nota-se que a informação dada pelos dois quadrantes é distinta. O primeiro quadrante informa o aumento máximo da nova geração em uma dada barra candidata considerando também a elevação até o limite das existentes. A barra mais apta neste quadrante é aquela que suporta maior injeção de potência juntamente com as gerações existentes no caso base e em contingências. O segundo quadrante traz a informação distinta, pois nele a barra candidata mais apta é aquela onde o aumento é máximo com a redução das gerações existentes. Neste quadrante pode-se avaliar a questão onde conservação da energia nas gerações existentes será maior quando da introdução das novas gerações nas barras candidatas.

4.0 - RESULTADOS

Neste item são apresentados alguns resultados de simulações com a ferramenta SDSA *off-line* do programa ANAREDE para avaliação da inserção de novas gerações eólicas. Foram utilizados dois casos exemplos: um sistema tutorial de pequeno porte, utilizado na literatura e um caso de operação do planejamento da expansão do SIN, obtido diretamente do site do EPE – Empresa de Pesquisa Energética, considerando o avanço da energia eólica na costa nordeste brasileira, em particular nos estados do Ceará e do Rio Grande do Norte.

4.1 SISTEMA TUTORIAL

O sistema tutorial é denominado *Brazilian Birds* e seus dados encontram-se disponíveis para *download* em (12), no formato do programa ANAREDE. A topologia do sistema está mostrada na FIGURA 7. Este sistema possui 48 barras (3 PV's, 1 V0 e as restantes são do tipo PQ), 59 circuitos (incluindo linhas de transmissão, transformadores e compensadores série) e 7 compensadores *shunt* fixos. As cargas do sistema totalizam 1200+j350 MVA e seus quatro geradores estão nas barras 10 (CANARIO-18), 20 (TUCANO--13), 21 (GAVIAO--13) - representando 3 UHE's ou unidades hidráulicas - e 11 (SABIA---13) - representando 1 UTE ou unidade térmica. Os despachos iniciais nos quatro geradores são 357,3 MW, 200 MW, 400 MW e 300 MW, respectivamente.

Como o foco do trabalho é avaliar a máxima de penetração eólica que cada barra candidata pode receber dentro de um conjunto pré-determinado, foram escolhidas como candidatas as barras de tensão do nível de 230 kV que não possuíam geração. São elas as barras 100 (CANARIO230), 110 (SABIA--230), 120 (CARDEAL230), 130 (CURIO--230), 150 (TIZIU--230), 200 (TUCANO-230), 210 (GAVIAO-230), 220 (ARARA--230), 230 (PELICAN230), 240 (CORUJA-230), 250 (URUBU--230) e 260 (GARCA--230), totalizando 12 barras PQ que formarão o grupo G3 da RSE. Importante salientar que neste estudo a injeção é de potência ativa, sem controle de tensão.

A geração existente deste SEP composta pelos quatro geradores foi assim dividida nos dois grupos restantes da RSE: o grupo G2 é composto pelas barras 10 (CANARIO-18), 20 (TUCANO--13) e 21 (GAVIAO--13), que são as UHE's e o grupo G1 é formado apenas pela barra 11 (SABIA---13), única UTE do sistema. O grupo G1 é o responsável pelo desbalanço na transferência de geração entre os grupos G2 (UHE's existentes) e G3 (novas eólicas). Com as UHE's no grupo G2 é possível avaliar o quanto a injeção das novas gerações eólicas pode auxiliar no sentido de manter a energia primária armazenada nos reservatórios das UHE's, caso existam.

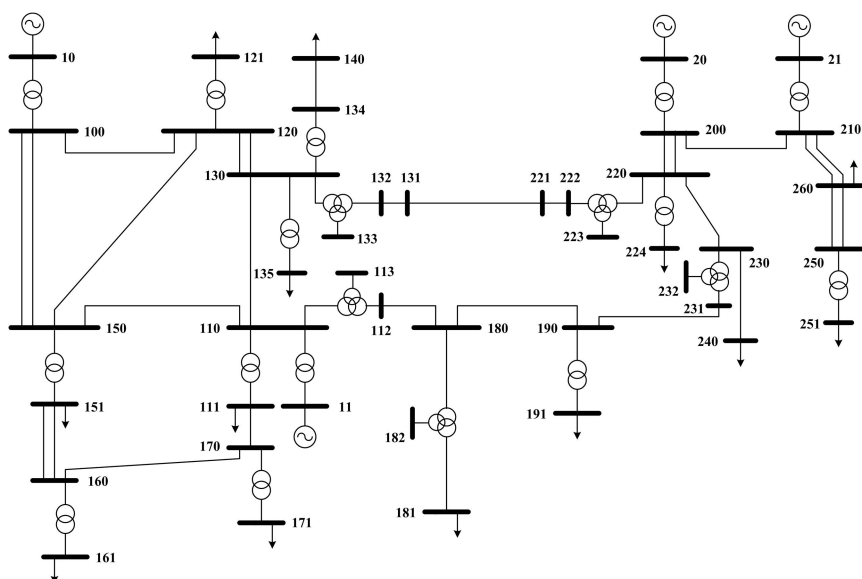


FIGURA 7 – Sistema tutorial *Brazilian Birds*

Foram definidas 26 contingências de circuito (excluindo os compensadores série e os transformadores de 3 enrolamentos) desde 69kV até 440kV, que não causaram ilhamento, visando a avaliação da segurança estática na RSE a partir de um critério “N-1”. Esta lista de contingências está na Tabela 1.

Tabela 1 – Lista de contingências “N-1” do sistema tutorial

Identificação das contingências de circuito											
1	CANARIO230	CARDEAL230	[1]	10	CARDEAL230	CURIO-230	[2]	19	TUCANO-230	ARARA-230	[1]
2	CANARIO230	TIZIU-230	[1]	11	CARDEAL230	TIZIU-230	[1]	20	TUCANO-230	ARARA-23	[2]
3	CANARIO230	TIZIU-230	[2]	12	CURIO-230	CURIO--69	[1]	21	GAVIAO-23	GARCA-230	[1]
4	SABIA-230	CURIO-230	[1]	13	CURIO-230	CURIO--69	[2]	22	GAVIAO-230	GARCA-230	[2]
5	SABIA-230	TIZIU-230	[1]	14	TIZIU-138	PARDAL-138	[1]	23	ARARA-230	PELICAN230	[1]
6	SABIA-230	SABIA-138	[1]	15	TIZIU-138	PARDAL-138	[2]	24	PELICAN230	URUBU-230	[1]
7	SABIA-138	AZULAO-138	[1]	16	PARDAL-138	AZULAO-138	[1]	25	URUBU-230	GARCA-230	[1]
8	SABIA-440	BICUDO-440	[1]	17	BICUDO-440	CHOPIN-440	[1]	26	URUBU-230	GARCA-230	[2]
9	CARDEAL230	CURIO-230	[1]	18	TUCANO-230	GAVIAO-230	[1]				

Pequenas alterações foram feitas no caso base original disponível em (12) para permitir uma melhor visualização da RSE. No caso da tensão, o grupo limite de tensão em emergência para todas as barras vai de 90% a 110% da tensão nominal. No caso dos fluxos, o limite de emergência foi definido como 1,5 do valor nominal. Para os três geradores existentes pertencentes ao grupo G2, os limites máximos de potência ativa já estavam definidos, totalizando 1707 MW. O gerador do grupo G1 (UTE) manteve seu limite original em 300 MW e até este limite atenderá o desbalanço na transferência de geração entre os grupos G2 e G3. A barra V θ do caso original é a 10 (CANARIO-18). Porém para separar as perdas e o despacho em cada caso do processo de construção da RSE, a barra 10 (CANARIO-18) foi dividida. A barra 10 original se tornou uma barra PV, com o despacho original do caso base, estando conectada à uma nova barra V θ por um circuito de baixa impedância. Este artifício permite a alteração do despacho original sem a inclusão de perdas nos diversos casos de transferência de geração.

Utilizando a ferramenta de construção de RSE do programa ANAREDE, a partir da definição dos três grupos com o Código de Execução DVSA, dos limites de geração através do Código de Execução DGER e da execução da funcionalidade através do Código de Execução EXRS, foram obtidos os planos G1xG2, G1xG3 e G2xG3 para as 12 barras candidatas avaliadas para receber a nova geração eólica. Foram simuladas em cada caso 20 direções nos dois quadrantes da RSE. Para explicar de maneira tutorial os resultados, inicialmente serão avaliados os planos G1xG2 e G2xG3 da barra 130 (CURIO--230), apresentados na FIGURA 8. Segundo o anteriormente exposto para a FIGURA 6, a RSE para avaliar a introdução de novas fontes possui apenas dois quadrantes. Logo a parte (b) da FIGURA 8 mostra estes dois quadrantes, divididos através da linha tracejada vertical, começando no ponto do caso base, indicado pela seta com as iniciais “OP”. À direita da linha tracejada está o primeiro quadrante, onde crescem simultaneamente dos grupos G2 e G3. G3 parte de zero e G2 parte da soma do despacho dos geradores no caso base. À esquerda da linha tracejada está o segundo quadrante, onde cresce o grupo G3, partindo do zero e decresce o grupo G2 da geração das UHE's.

A RSE construída pelo programa ANAREDE apresenta 5 limites: Tensão (linha verde), Térmico (linha azul), Mvar (linha marrom), Segurança (linha amarela) e MW (linha laranja). A área onde não há nenhuma violação tem a cor verde e representa a área segura de operação para um determinado despacho entre G1, G2 e G3, para o caso base e contingências. Se o limite de tensão (barras) ou térmico (linhas/transformadores) é atingido no caso base ou em contingência, a cor da área tende ao amarelo. Se alguma contingência não converge, a cor da área torna-se laranja. Se o caso base deixa de convergir (limite de MW), este é o último limite da RSE. Deseja-se que o ponto de operação esteja dentro da área segura, na área de cor verde.

Analisando a FIGURA 8 (b), primeiro quadrante, observa-se que as UHE's vão de 1057 MW no caso base até aproximadamente 1125 MW na região segura. Já a nova geração alcança no máximo 200 MW quando as UHE's permanecem no valor do caso base. O limite da RSE na parte à direita se deve FIGURA 8 (a), pois neste quadrante ambas as gerações (UHE's e nova) crescem e, portanto, o grupo G1 (UTE) reduz para fechar o desbalanço. Tomando como exemplo o máximo de 200 MW atingido por G3 sem alterar G2, observarmos que a distância entre o caso base (marca “OP”) e o valor zero no eixo G1 da FIGURA 8 (a) é exatamente 200 MW. Portanto a capacidade de crescer G2 e G3 no primeiro quadrante da FIGURA 8 (b) se deve a capacidade de G1 de absorver neste sistema. Analisando agora o segundo quadrante na FIGURA 8 (b), as UHE's têm o despacho reduzido e G3 (nova geração) cresce. Nesta condição as UHE's podem ser reduzidas de 1057 MW para aproximadamente 600 MW e a nova geração alcança 630 MW na região segura. Neste quadrante o crescimento de G3 é compensado pela redução de G2. Caso G2 aumente mais que G3, G1 deve reduzir. Se G2 aumentar menos do que G3, G1 deve crescer, sempre respeitando seus limites. Novamente, o limite da RSE na FIGURA 8 (a) se deve a G1, pois quando G2 não compensa totalmente o aumento de G3, G1 deve crescer. Como o limite de G1 (UTE) é de 300 MW, a margem de crescimento de G1 do caso base até o limite é de 100 MW. Se for considerada a direção onde somente G2 é reduzido sem o crescimento de G3, nota-se que a distância entre o caso base e o limite à esquerda da região é de 100 MW. Embora os limites à esquerda e à direita neste caso tenham ocorrido em função da G1, estes também dependem do máximo de G2 (à direita) e do mínimo de G2 (à esquerda).

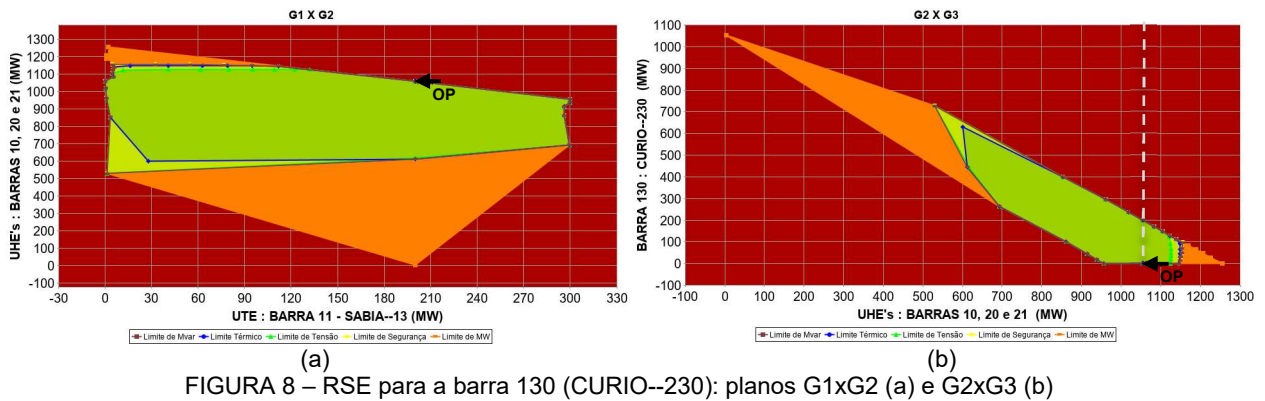


FIGURA 8 – RSE para a barra 130 (CURIO--230): planos G1xG2 (a) e G2xG3 (b)

Seguindo a análise das barras candidatas, vemos na FIGURA 9 a RSE com os planos G1xG2 (a) e G2xG3 (b) para a barra 120 (CARDEAL230). Toda a análise aplicada à barra 130 (FIGURA 8) vale integralmente para a barra 120 (e também para as demais regiões de segurança). A diferença no primeiro quadrante se aplica a uma ligeira redução da região segura e, portanto, na capacidade de crescimento conjunto de G2 e G3. Já no segundo quadrante, nota-se também uma redução da área segura, pois o limite da área segura em G2 é de 650 MW, contra 600 MW da FIGURA 8. As barras 130 e 120 são as melhores opções para instalação da nova geração eólica, em função de possuírem as maiores regiões seguras dentre as doze barras candidatas analisadas.

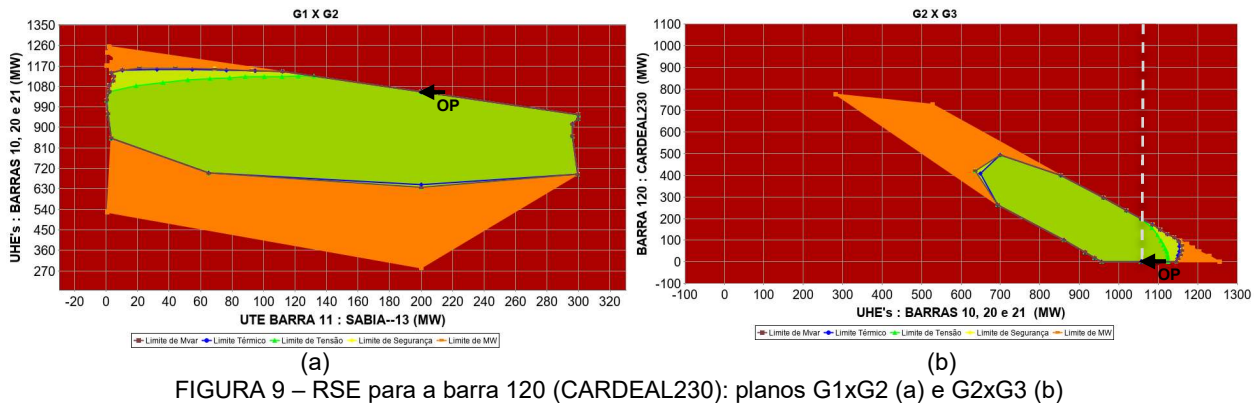


FIGURA 9 – RSE para a barra 120 (CARDEAL230): planos G1xG2 (a) e G2xG3 (b)

Em contraponto às regiões da FIGURA 8 e da FIGURA 9, temos o plano G2xG3 da RSE para as barras 100 (CANARIO230) e 260 (GARÇA--230) na FIGURA 10, que são as duas piores opções para receber a injeção de potência da nova geração eólica. A escala foi mantida para a comparação entre melhores e piores barras candidatas. Ao avaliar as RSE da FIGURA 10, tanto no primeiro quadrante quanto no segundo, a margem para crescimento conjunto ou para crescimento da geração eólica com redução das UHE's é bem inferior se comparado aos da FIGURA 8 e da FIGURA 9. Outro aspecto a ser avaliado é a razão para a redução drástica da área segura. Na FIGURA 10 (a) a contingência 1 entre as barras 100 e 120 da Tabela 1 é a responsável pela limitação da RSE. Isto se explica pela observação do sistema na FIGURA 7. A contingência dificulta o escoamento da potência da UHE da barra 10 e por isso limita a expansão da área segura.

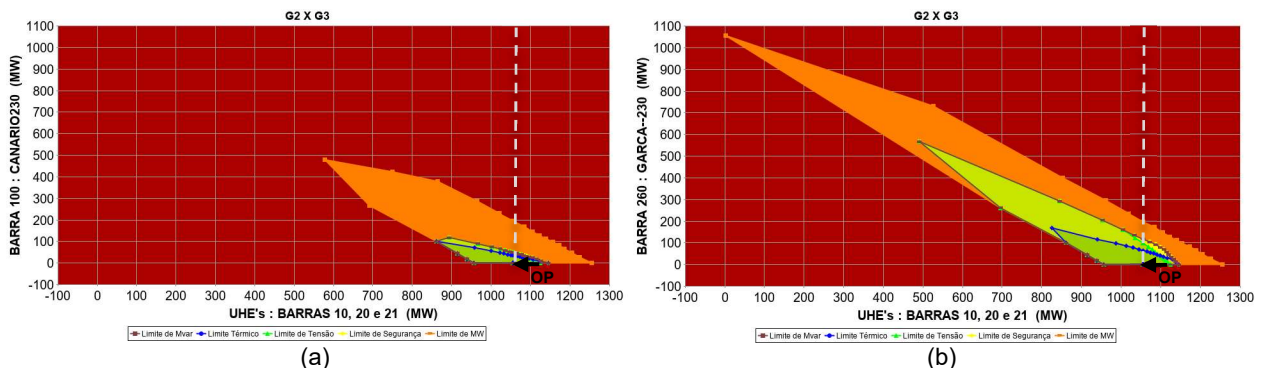


FIGURA 10 – RSE plano G2xG3 para as barras 100 (CANARIO230) e 260 (GARÇA--230)

4.2 SISTEMA DE GRANDE PORTE

Para a avaliação da ferramenta SDSA *off-line* do programa ANAREDE em sistemas de grande porte foram escolhidos 4 casos da EPE referentes ao ano de 2027, sendo utilizada como referência de dados a base de dados

fornecida em conjunto com o Plano Decenal de Energia 2027 (5). Foram escolhidos os seguintes cenários para as simulações:

- Caso 1 → Carga Leve – Norte Seco;
- Caso 2 → Carga Leve – Norte Úmido;
- Caso 3 → Carga Média – Norte Seco;
- Caso 4 → Carga Média – Norte Úmido.

O principal objetivo deste estudo é avaliar a inserção de uma fazenda eólica de até 1,2 GW em algumas barras situadas na região nordeste. Neste contexto, a título de exemplificação, foi escolhida a barra de Acaraú III em 500 kV como barra candidata. Esta barra foi considerada no Grupo 3 de geração. Além disso, foram feitas as seguintes considerações para a construção das RSE:

- O Grupo 2 foi formado pelas UHEs do Rio São Francisco;
- O Grupo 1 foi formado pelas UTEs no N/NE.

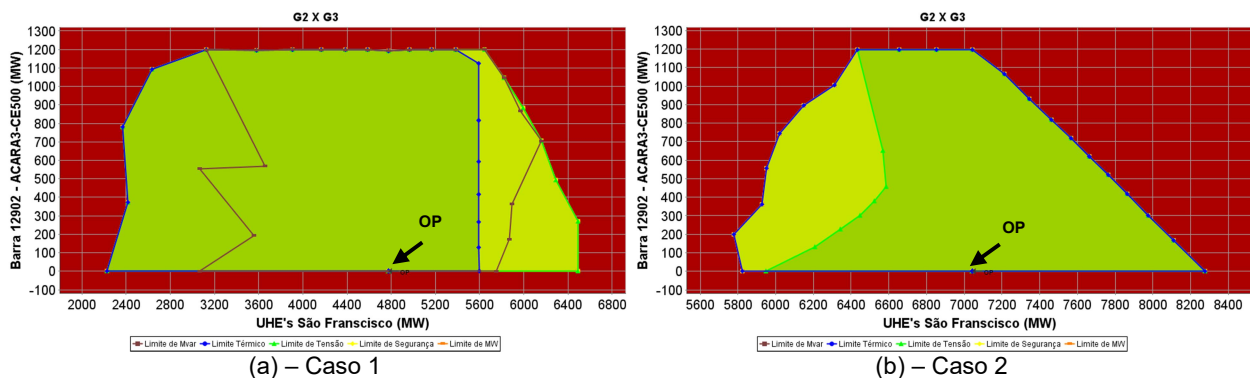
A definição dos grupos de geração foi feita como o objetivo de se explorar as limitações internas do sistema de transmissão da região NE. Destaca-se que outras configurações de grupos devem ser adotadas para estudos de intercâmbio.

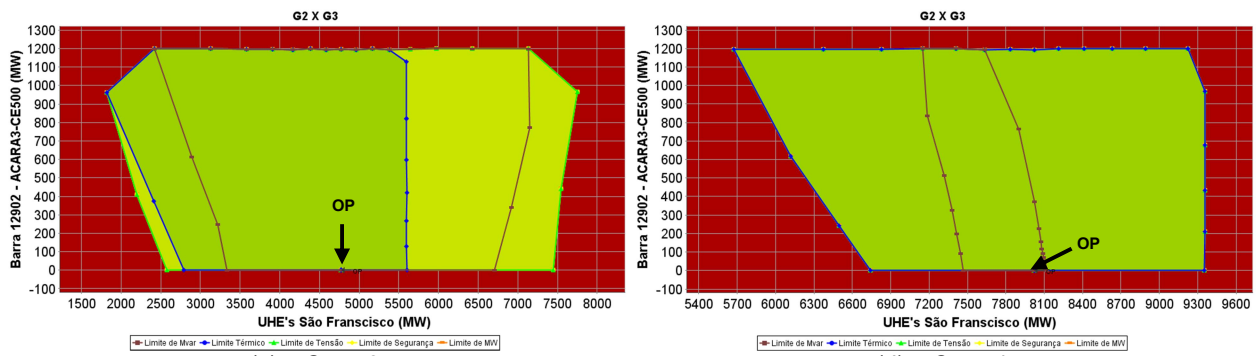
A Tabela 2 mostra as gerações das UHEs do Grupo 2 em cada caso de referência utilizado bem como os limites mínimo e máximo de geração utilizados durante a obtenção da RSE. No Grupo 1 foram consideradas as UTEs (49 usinas ao todo) e foi considerado como limite mínimo 0 MW e limite máximo de 7107,9 MW. A especificação da geração de cada UTE, limite mínimo e máximo foi omitido devido a limite de páginas do artigo. Finalmente no Grupo G3 foi considerada a barra candidata com limites de 0 MW e 1200 MW. Em relação à lista de contingências, adotaram-se todos os circuitos envolvendo as barras de 500 kV e 230 kV dos estados do Ceará e Rio Grande do Norte, totalizando 239 contingências.

Tabela 2 – Geração das UHEs do Grupo 2 nos casos de referência do PDE-2027

Nome da Barra	Geração Caso 1 (MW)	Geração Caso 2 (MW)	Geração Caso 3 (MW)	Geração Caso 4 (MW)	Geração Mínima (MW)	Geração Máxima (MW)
PAF1-1UHE013	50	150	50	150	50	180
PAF2A1UHE013	70	70	70	70	70	70
PAF2A2UHE013	70	70	70	70	70	70
PAF2A3UHE013	70	70	70	70	70	75
PAF2B1UHE013	51	58,7	51	60,6	51	76
PAF2B2UHE013	50	58,5	50	60,6	51	76
PAF2B3UHE013	51	58,7	51	60,6	51	76
PAF3-1UHE013	151	315,7	151	319,2	151	400
PAF3-2UHE013	151	315,7	151	319,2	151	400
PAF4-1UHE013	1230	1781	1230	1963	240	2280
SOBRA1UHE013	525	420	525	840	61	876
ASALE1UHE013	100	137,6	100	159,6	51	200
ASALE2UHE013	100	137,6	100	159,6	51	200
LGONZ1UHE013	375	538,5	375	598,5	151	690
LGONZ2UHE013	151	569	151	598,5	151	690
XINGO1UHE013	1581	2292	1581	2523	300	3000
TOTAL	4776 MW	7043 MW	4776 MW	8022,4 MW	1720 MW	9359 MW

A FIGURA 11 mostra a RSE obtida para a inclusão de 1,2 GW de geração eólica na barra 12902 em cada um dos cenários utilizados. De uma forma geral, é possível verificar que a manutenção do nível de geração nas UHEs do rio São Francisco e a inserção da geração eólica não causou nenhum tipo de violação. Entretanto, ao se considerar diferentes condições de geração hidráulica ocorreram violações causadas por limites de fluxo e/ou geração de potência reativa e o atingimento da máxima ou mínima geração das UTEs.





(c) – Caso 3
 (d) – Caso 4
 FIGURA 11 – RSE plano G2xG3 para a barra 12902 – Casos 1, 2, 3 e 4

5.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo principal analisar o uso das Regiões de Segurança Estáticas (RSE) na avaliação do impacto da penetração de novos parques eólicos em barras candidatas. Para isto os três grupos básicos de geração representativos das RSE foram as Unidades Térmicas - UTE (G1), Unidades Hidráulicas - UHE (G2) e a nova geração eólica (G3). No plano base G2xG3, o primeiro quadrante representa o crescimento conjunto da geração hidráulica existente com a nova geração eólica, avaliando em cada barra candidata a máxima penetração eólica com a geração hidráulica até seu limite máximo. Já o segundo quadrante representa o crescimento da nova geração eólica com a respectiva redução da geração hidráulica, visando avaliar o quanto a penetração eólica pode contribuir para reduzir o despacho hidráulico e evitar assim a depleção dos reservatórios das usinas. O grupo G1 das UTEs fica com a missão de fechar o desbalanço entre G2 e G3 nos dois quadrantes do plano G2xG3.

A avaliação consistiu em observar a RSE para cada uma das barras candidatas. Aquelas cuja região segura tem maior área nos dois quadrantes do plano G2xG3 são as que possuem maior capacidade de escoamento da nova potência, tanto para o caso base quanto para cada contingência do critério “N-1”. A partir dos resultados para o sistema de grande porte, foi possível analisar como o aumento do montante de penetração eólica impactou no horizonte estudado para a barra selecionada. Considerando o montante escolhido de até 1,2 GW de penetração, é possível observar a extensão da região segura com as usinas do Rio São Francisco podendo variar do caso base em direção tanto ao máximo quanto ao mínimo.

O uso da RSE na análise de alternativas de pontos de conexão com grande penetração eólica se mostrou bastante interessante e promissora. A capacidade de representar em um plano uma região segura para a operação do caso base e das contingências auxilia na interpretação de um extenso conjunto de resultados que vem da solução de muitos casos de fluxo de potência, comuns nos estudos de regime permanente que precedem à entrada de grandes blocos de geração em horizontes de longo prazo do planejamento.

6.0 - AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido dentro do projeto “ESTUDO DE METODOLOGIAS PARA A CONEXÃO DE USINAS EÓLICAS DE INDÚSTRIAS OFFSHORE DE GRANDE E PEQUENO PORTE - ASPECTOS ELÉTRICOS E ENERGÉTICOS” PD-00553-0045/2016 no âmbito do programa de P&D do sistema elétrico regulado pela ANEEL.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Morison, K., Wang, L., Kundur, P., “Power System Security Assessment”, IEEE Power & Energy Magazine, Sep/Oct 2004.
- (2) Almeida, Felipe C. B. ; Passos Filho, João A. ; Pereira, José L. R. ; Henriques, Ricardo M. ; Marcato, André L. M. . Assessment of Load Modeling in Power System Security Analysis Based on Static Security Regions. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, v. 24, p. 148-161, 2013.
- (3) Assis, T.M.L., “Cálculo da Capacidade de Transmissão Dinâmica em Sistemas de Potência Através de Ferramentas Integradas e Sistemas Inteligentes”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- (4) GWEC, “Global Wind Statistics - 2017”, 2017. [Online]. Available: <http://www.gwec.net/>. [Acesso em 28/04/2019].
- (5) PDE, “Plano Decenal de Expansão de Energia - 2027”, 2018. [Online]. Available: http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202027_ aprovado_OFICIAL.pdf. [Acesso em 28/04/2019].
- (6) Ortiz, G. P., Kampel, M., “POTENCIAL DE ENERGIA EÓLICA OFFSHORE NA MARGEM DO BRASIL”, 2011. [Online]. Available: http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2011/07.06.17.10/doc/Ortiz_Potencial.pdf. [Acesso em 28/04/2019].
- (7) PNE, “Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050”, 2018. [Online]. Available: http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202027_ aprovado_OFICIAL.pdf. [Acesso em 28/04/2019].
- (8) Silva Neto, C.A., Quadros, M.A., Santos, M.G., Jardim, J.L.A., Lima, M.C., “Brazilian System Operator Online Security Assessment System”, IEEE PES General Meeting, Minneapolis, MN, USA, 2010.

- (9) Barbosa, L.B., "Desenvolvimento de uma Ferramenta Automática para a Determinação da Máxima Transferência de Potência entre Áreas/Regiões em Regime Permanente", Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil, 2009.
- (10) Henriques, R.M., Passos Filho, J.A., Alves, F.R.M., Barbosa, L.B., Guimarães, C.H.C., Almeida, F.C.B., "Desenvolvimento de Uma Ferramenta Automática para a Determinação da Máxima Transferência de Potência Entre Áreas/Regiões em Regime Permanente", XXI SNPTTE, Florianópolis, SC, Brasil, 2011.
- (11) Alves, F.R.M., Henriques, R.M., Passos Filho, J.A., Gomes Junior, S., Borges, C.L.T., Rangel, R. D., Falcão, D.M., Aveleda, A.A., Taranto, G.N., Assis, T.M.L., "Ferramenta Integrada para Avaliação da Segurança Estática e Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência de Grande Porte", XII SEPOPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.
- (12) Power System Data, "Brazilian Data - Brazilian Birds: ANAREDE", 2019. [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/powersystemdata/brazilian-data/brazilian-birds>. [Acesso em 28/04/2019].

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



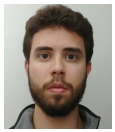
Ricardo Mota Henriques nasceu em Juiz de Fora, Minas Gerais, em 16 de setembro de 1971. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 1996, concluiu o mestrado e o doutorado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) em 2002 e 2009 respectivamente. Trabalhou Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL – de 1997 a 2013, atuando no desenvolvimento de modelos e aplicações computacionais para análise de redes elétricas, em especial no programa ANAREDE. Atualmente é professor Adjunto IV da Faculdade de Engenharia na UFJF. Seus interesses incluem, ainda, avaliação de segurança de tensão e análise de autovalores e autovetores aplicados ao controle de tensão. É membro sênior do IEEE.



João Alberto Passos Filho nasceu em Juiz de Fora, Minas Gerais, em 9 de julho de 1972. Possui graduação e mestrado em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF (1995 e 2000) e doutorado em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/COPPE (2006). Foi *trainee* do Grupo WEG durante o ano de 1996 e trabalhou por dez anos no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL, atuando principalmente no desenvolvimento dos programas ANAREDE e FLUPOT. Atualmente é professor Associado I da Faculdade de Engenharia na UFJF. Tem experiência na área de desenvolvimento de modelos computacionais, atuando principalmente nos seguintes temas: análise de redes em regime permanente, segurança de tensão e otimização de sistemas potência. É membro sênior do IEEE.



Ranielli Vieira Pombo é aluno de graduação em Engenharia Elétrica - Energia pela Universidade Federal de Juiz de Fora desde 2014. Atualmente é bolsista de iniciação científica do projeto intitulado "Estudo de Metodologias para a Conexão de Usinas Eólicas Offshore de Grande e Pequeno Porte: Aspectos Elétricos e Energético", em um convênio PETROBRAS-UFJF, onde trabalha com análise de casos de fluxo de potência.



Tobias Barata é aluno de graduação em Engenharia Elétrica - Habilitação em Energia pela Universidade Federal de Juiz de Fora desde 2014. Atualmente é bolsista de iniciação científica do projeto intitulado "Estudo de Metodologias para a Conexão de Usinas Eólicas Offshore de Grande e Pequeno Porte: Aspectos Elétricos e Energético", em um convênio PETROBRAS-UFJF, onde trabalha com análise de casos de fluxo de potência. É também bolsista voluntário no projeto "Montagem de um Banco de Ensaios para Propulsão Aeronáutica Híbrido Elétrica" em um convênio EMBRAER-UFJF, onde trabalha com a modelagem e controle de um conversor bidirecional.



Rodrigo Dias possui graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica de Potência pela Universidade Federal de Minas Gerais (2011). Concluiu o mestrado na UFMG na área de Qualidade de Energia em 2018. Ingressou na Petrobras em 2012 para realização do Curso de Especialização em Equipamentos Elétricos para a Indústria do Petróleo e Gás Natural. Desde 2013 é engenheiro de equipamentos do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES/PETROBRAS) atuando como gestor de P&D em Energia Eólica, Solar Fotovoltaica, armazenamento de baterias e Termelétricas.



Flávio Rodrigo de Miranda Alves nasceu no Rio de Janeiro em 15 de Março de 1963. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense em 1986 e em Ciência da Computação pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1987, concluiu o mestrado em Engenharia de Sistemas e Computação na Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) em 1992 e o doutorado em Engenharia Elétrica, na mesma instituição, em 2007. É pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL – desde 1987, atuando no desenvolvimento de aplicações computacionais para análise de redes. Atualmente chefia o Departamento de Redes Elétricas – DRE. Seus interesses incluem, ainda, ambientes integrados de interface gráfica e banco de dados para operação e planejamento de sistemas elétricos de potência, metaheurísticas e recomposição de sistemas elétricos de potência. É membro do IEEE e do Comitê de Estudos C2 do Comitê Nacional Brasileiro da CIGRÉ.