



Grupo de Estudo de Análise e Técnicas de Sistemas de Potência-GAT

**NOVA FORMULAÇÃO PARA SEGURANÇA ROBUSTA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA
VIA FUNÇÕES MULTI OBJETIVO CONSIDERANDO INCERTEZAS**

**CARLOS A. DA SILVA NETO (2,1) ; MARCELOS GROETAERS DOS SANTOS (2,1) ; MARCUS SCHILLING * (1)
ONS (2); UFF (1)**

RESUMO

Este artigo propõe uma nova formulação flexível englobando diversos enfoques relativos ao problema conceitual da otimização da segurança de sistemas de potência. Essa estratégia, expressa na forma de taxionomia, pode ser convenientemente estendida, passando a incluir tópicos adicionais, tornando-se útil para o desenvolvimento de um protótipo computacional para análise avançada da segurança de sistemas de potência. Para ilustrar a potencialidade da proposta, duas soluções originais [1] envolvendo a otimização da segurança são aqui apresentadas: a primeira trata de uma *formulação multiobjetivo inédita* [2] e a segunda revela o uso de um *novo indicador de segurança* considerando diversas incertezas probabilísticas.

PALAVRAS-CHAVE

Dinâmica; Incerteza; Otimização Multiobjetivo; Segurança; Simulação Eletromecânica.

1.0 - INTRODUÇÃO

A operação de sistemas de potência planejada a partir da “*análise do pior caso*” resulta em cenários nos quais o sistema tende a sobreviver a distúrbios extremos que, embora raros, poderiam resultar em desligamentos em cascata. Essa abordagem normalmente é muito conservadora e resulta em soluções não otimizadas do ponto de vista econômico, tendo como exemplo o despacho inadequado de uma unidade termoeletrica, ou ainda a restrição exagerada no intercâmbio energético entre duas áreas. A despeito dessa prática geral, o senso comum diz que é importante ponderar a interpretação dos resultados das simulações computacionais de acordo com a probabilidade da perturbação e da condição do sistema sob estudo. Portanto, a necessidade de consideração das incertezas é fartamente reconhecida na literatura [3-7], [10], [31] a despeito das dificuldades intrinsecamente associadas. Assim, é inquestionável a urgente necessidade de aprofundamento de pesquisas e desenvolvimento para o avanço prático da análise de segurança considerando a presença de incertezas.

Apesar dessa evidência, enquanto a análise probabilística de confiabilidade (considerando apenas o regime estático) encontra-se em razoável estado de maturidade e desenvolvimento [3], o mesmo não ocorre no que concerne à denominada análise de segurança probabilística. Isto acontece porque, até recentemente, não havia nenhum mecanismo para computar probabilidades nos programas atuais de análise de estabilidade e as ponderações eram realizadas de forma imprecisa, com base no “bom senso” nem sempre fundamentado em uma estatística realista.

Ao analisar a literatura sobre o problema de otimização da segurança dinâmica, observa-se inicialmente que a maioria das formulações tem apenas o enfoque mono-objetivo e que também ocorre uma divisão das diferentes abordagens propostas em dois grandes conjuntos. O primeiro consiste na utilização de algoritmos convencionais determinísticos. O segundo corresponde à utilização de técnicas de inteligência artificial como redes neurais ou ainda lógica difusa. Trabalhos mais recentes propõem a utilização combinada dessas metodologias, porém ainda sob a perspectiva determinística. No entanto, a utilização de meta-heurísticas em problemas de otimização na área de dinâmica de sistemas de potência é ainda praticamente restrita ao projeto ou ajuste de parâmetros de controladores, permanecendo tratada deterministicamente. Assim, identifica-se aí uma promissora área de pesquisas.

Por outro lado, cabe aqui observar que o uso de meta-heurísticas nos procedimentos de otimização não necessariamente garante a obtenção de soluções ótimas globais no sentido estrito do termo. Porém, sob o ponto de vista da boa engenharia, tais técnicas usualmente viabilizam soluções melhores, cujas diferenças em relação às

soluções ótimas não justificam a insistência na busca do ótimo, dado que os esforços e custos que seriam necessários para a eliminação dessas diferenças não seriam recompensados. Por este motivo, os termos “otimização” e “melhoria” podem ser entendidos como intercambiáveis neste texto.

Nessa perspectiva, o artigo propõe inicialmente uma taxionomia englobando diversos enfoques relativos ao problema conceitual da otimização da segurança de sistemas de potência. Essa taxionomia tem caráter evolutivo e flexível, podendo ser convenientemente estendida, passando a incluir tópicos não abordados aqui. Como tal, torna-se útil para o desenvolvimento de um protótipo computacional para a análise avançada da segurança usando uma metodologia que se baseia na utilização combinada de meta-heurísticas e técnicas de otimização convencionais, utilizando simulações eletromecânicas completas [8-9]. Desta forma, pode ser aplicada a problemas tão distintos como os que envolvem o convencional ajuste local de parâmetros de reguladores e o inovador aumento da segurança dinâmica global do sistema elétrico como um todo.

É assim evidente que o futuro desenvolvimento de um ambiente computacional flexível, oferecendo um amplo cardápio de opções, capaz de permitir o uso combinado de técnicas clássicas de otimização com as novas estratégias baseadas em meta-heurísticas, representará uma útil ferramenta prática para a análise de uma variada gama de problemas complexos envolvendo a otimização da segurança de sistemas de potência de grande porte, modelados de forma compatível para uma acurada simulação no domínio do tempo. O ataque a essa gigantesca tarefa pode ser singelamente iniciado com a proposição basilar da taxionomia aqui esboçada, que auxilie o analista durante a construção do ambiente computacional que se deseja desenvolver. A principal vantagem dessa estratégia para a obtenção de um protótipo “otimizador universal” é o oferecimento de uma visão global do conjunto de necessidades envolvendo a escolha de técnicas de otimização, funções objetivo, tipos de restrições e conjuntos de opções para a modelagem dinâmica detalhada de componentes. Com um tal ambiente disponível, o analista poderá customizar sua proposta de solução para cada tipo de problema identificado na taxionomia sugerida. Essa é sua grande utilidade. Para ilustrar a potencialidade dessa proposta, duas soluções originais envolvendo a otimização da segurança são aqui apresentadas [1]: a primeira trata de uma formulação multiobjetivo inédita, e a segunda revela o uso de um novo indicador de segurança considerando diversas incertezas probabilísticas do sistema. Os resultados obtidos mostram a praticidade e eficácia do protótipo desenvolvido, aplicando os conceitos aqui mencionados.

2.0 - TAXIONOMIA DE SEGURANÇA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA: PROPOSTA CONCEITUAL

A taxionomia de segurança de sistemas de potência sugerida é apresentada nas Tabelas 1 e 2, onde sua aplicação prática é ilustrada com 15 problemas, 13 dos quais são clássicos e 2 são originais (vide problemas # 8 e # 15). Nota-se que o objetivo aqui é apenas esboçar o conceito sugerido e não esgotar todas as possibilidades de tratamento dos problemas de segurança. Portanto, procura-se tão-somente observar a natureza flexível da classificação adotada, enfatizando-se que diversos outros importantes problemas de segurança, não incluídos nessas tabelas, podem ser convenientemente acomodados nas mesmas. A exploração da flexibilidade inerente ao uso de meta-heurísticas é um dos focos de investigação deste artigo. Assim, os diferentes problemas analisados são classificados de acordo com o grau de abrangência espacial da *função objetivo*, das *variáveis de controle* e *restrições*, bem como a consideração ou desprezo das *incertezas* (vide Tabela 1). Na Tabela 2, são enfatizadas algumas correlações entre diferentes possibilidades de funções objetivo e as respectivas variáveis de controle e restrições, identificando-se várias categorias de problemas clássicos de segurança. As duas tabelas em conjunto auxiliam nas tarefas de formulação, classificação e modelagem dos problemas de interesse. Tornam então mais fácil a escolha do arsenal de alternativas a serem usadas pelo analista num ambiente computacional passível de customização via cardápio de opções. A Tabela 1 classifica os problemas de segurança sob três aspectos: *i*) sob o ponto de vista da presença ou ausência de incertezas na modelagem, gerando então formulações *determinísticas* ou *estocásticas*; *ii*) sob o enfoque espacial, identificando problemas de natureza *local*, *sistêmica* ou *híbrida*; *iii*) sob o aspecto da abrangência de função objetivo a ser otimizada, reconhecendo tratamentos *mono* ou *multiobjetivos*. Enquanto as categorias (*i* e *iii*) são autoexplicativas, a classe (*ii*) fica melhor compreendida esclarecendo-se que os problemas ditos *locais* são aqueles com nítida especificação espacial, tais como o ajuste de estabilizadores (“*power system stabilizer*” - *PSS*), seleção de parâmetros de reguladores de velocidade, análise de oscilações subsíncronas ou o tratamento de algum problema de amortecimento com origem geográfica bem identificada. A categoria *sistêmica* trata de problemas envolvendo diversas variáveis espacialmente espalhadas em grande área do sistema, tais como no caso do estabelecimento da potência mais segura a ser transferida entre diferentes áreas elétricas ou a determinação dos despachos de geração ou ajustes de tapas de transformadores que proporcionam o melhor nível de segurança. A classe de problemas *híbridos* envolve os problemas que apresentam simultaneamente condicionantes de larga escala espacial aliados a restrições de natureza estritamente local. Aqui é interessante observar que, com a proposição das categorias sugeridas, a literatura mostra que [5-7], [31] são praticamente inexplorados os problemas de natureza multiobjetiva, sistêmica e estocástica, conforme ressaltado na Tabela 1. Também na Tabela 2, apontam-se diversos problemas de segurança ainda não formulados de forma abrangente, inéditos ou pouco investigados, seja pela dificuldade de solução ou relativa impertinência. Para fins de ilustração, cabe a seguir justificar o enquadramento de diversos problemas relevantes de segurança na tipologia aqui sugerida.

Na Tabela 1, indica-se que os problemas (1- Projeto de controladores automáticos de tensão, *i.e.* *RT*), (2- Identificação de parâmetros) e (3- Projeto de reguladores de sinais estabilizadores, *i.e.* *PSS*) são usualmente formulados na categoria determinística, local e mono-objetiva, se consideradas apenas as restrições locais. Na Tabela 2, registra-se que a formulação usual para os problemas 1 e 2 propõe o emprego de uma função objetivo do tipo mínima norma Euclidiana, enquanto para o problema 3 demanda-se uma função objetivo buscando o máximo amortecimento local. Comentários do mesmo teor são válidos para os problemas 4 e 5.

TABELA 1 - TAXIONOMIA PARA UMA SELEÇÃO DE PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO DA SEGURANÇA

Formulação	Espacial	Função Objetivo	
		Mono	Multi
Determinística	Local	Local Mono-Objetiva s.a. Restrições Locais 1) Projeto de controladores 2) Identificação parâmetros 3) Amortecimento local PSS	Local Multiobjetiva s.a. Restrições Locais 4) Projeto de controladores / diagrama Bode (módulo & fase) 5) Identificação parâmetros & projeto de controle $c/2$ ou mais variáveis
	Híbrida	Sistêmica Mono-Objetiva s.a. Restrições Locais & Sistêmicas 6, 7) Amortecimento sistêmico	Sistêmica Multiobjetiva s.a. Restrições Locais & Sistêmicas 8) Amortecimento sistêmico + fluxo $n/$ interligação entre 2 áreas
	Sistêmica	Sistêmica Mono-Objetiva s.a. Restrições Sistêmicas 12) Fluxo $n/$ interligação entre 2 áreas 13) Variação na potência acelerante 14) Amortecimento sistêmico	Sistêmica Multiobjetiva s.a. Restrições Sistêmicas 9) Amortecimento sistêmico + fluxo $n/$ interligação entre 2 áreas 10) Mínimo despacho de potência ativa + fluxo $n/$ interligação entre 2 áreas 11) Fluxos $n/$ interligações entre diversas áreas
Estocástica	Sistêmica	Sistêmica Mono-Objetiva s.a. Restrições Sistêmicas & Incertezas 15) Índice de estabilidade aparente - IEA [11]	Pouco explorado ou sem formulação conhecida

Nota: Todos os 15 problemas são conceitualmente formulados na Tabela 2.

TABELA 2 - FORMULAÇÃO CONCEITUAL PARA UMA SELEÇÃO DE PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO DA SEGURANÇA

Função Objetivo	Problema a ser Resolvido	Variáveis de Controle e/ou Restrições			
		Variáveis de Controle	Variáveis de Controle + Restrições Pg, Qg, V, F	Restrições Pg, Qg, V, F	
Função Objetivo	Mínima Norma Euclidiana	Projeto de Controle RT	1) Determinística Mono, Local	NI	NI
		Identificação Paramétrica	2) Determinística Mono, Local	NI	NI
	Máximo Amortecimento Local	Projeto de Controle PSS	3) Determinística Mono, Local	NI	NI
	Diagrama de Bode	Projeto de Controle	4) Determinística Multi, Local	NI	NI
	Mínima Norma Euclidiana (2 curvas)	Identificação Paramétrica	5) Determinística Multi, Local	NI	NI
			Máximo Amortecimento Sistêmico	6) Determinística Mono, Híbrida	7) Determinística Mono, Híbrida
	Máximo Amortecimento Sistêmico + Máximo Fluxo $n/$ Interligação (singular / múltiplo)		NI	8) Determinística Multi, Híbrida	9) Determinística, Multi, Sistêmica
	Mínimo P_g + Máximo Fluxo $n/$ Interligação (singular / múltiplo)		NI	NI	10) Determinística, Multi, Sistêmica
	Máximo Fluxo de Interligações	Multiáreas	NI	NI	11) Determinística, Multi, Sistêmica
		Duas áreas	NI	NI	12) Determinística, Mono, Systemic
	Mínima Variação de Potência Acelerante		NI	NI	13) Determinística, Mono, Sistêmica
	Máximo Índice de Estabilidade Aparente (IEA)		NI	NI	15) Estocástica, Mono, Sistêmica

Notas: NI – não investigado, Pg – despacho de potência ativa, Qg – despacho de potência reativa, V – limites de tensão, F – limites de fluxo em linhas de transmissão e traços, RT – regulador de tensão, PSS – “power system stabilizer”.

Já os problemas 6 e 7 são classificados como determinísticos, híbridos e mono-objetivos, demandando uma função objetivo representativa do amortecimento sistêmico. Porém, a Tabela 2 indica que embora o problema 6 invoque uma função objetivo do tipo amortecimento sistêmico, o mesmo é formulado limitando as variáveis de controle a um conjunto local, específico de parâmetros de um dado PSS. Justifica-se então a classificação híbrida adotada porque as variáveis de controle e a restrição têm natureza local, mas a função objetivo tem, nesse caso, característica sistêmica. Por outro lado, a justificativa de classificação híbrida para o problema 7 oferece uma nuance ligeiramente diferente: as variáveis de controle (os parâmetros do PSS) também são de âmbito local, mas a agora as restrições também têm uma natureza sistêmica. No que concerne os problemas 8 e 9, observa-se que ambos envolvem a maximização simultânea do amortecimento sistêmico aliado à maximização dos fluxos elétricos entre áreas. Estes são clássicos problemas estudados desde os primórdios da análise de segurança de sistemas de potência. Ambos são naturalmente classificados como determinísticos e de natureza multiobjetiva. Porém o problema 8 tem uma natureza híbrida enquanto o problema 9 é enquadrado como sistêmico. Isso se explica porque o problema 8 inclui em sua formulação a otimização local de parâmetros de reguladores, combinado a um conjunto de restrições de âmbito sistêmico, quais sejam, as variáveis P_g , Q_g , V e F . Já o problema 9, embora similar ao problema 8, despreza quaisquer restrições especificamente localizadas. O conjunto de problemas 10 a 14 são todos enquadrados como determinísticos e sistêmicos, porém como o problema 10 envolve simultaneamente a minimização de geração (por exemplo, térmica) e a maximização do intercâmbio entre duas áreas, este é classificado como multiobjetivo. O mesmo ocorre com o problema 11, cujo objetivo é uma maximização de intercâmbios simultâneos entre várias áreas. Os problemas 12, 13 e 14 são exemplos clássicos de análise de segurança, exaustivamente tratados na literatura e que admitem classificação como determinísticos, sistêmicos e mono-objetivos. Finalmente, o problema 15 apresenta uma formulação original e robusta, que propicia um aumento da segurança global do sistema de potência, através da consideração de diversas incertezas matematicamente incorporadas em uma função objetivo adrede especializada [1], [11], [12]. Por este motivo, essa proposição é tratada como estocástica, sistêmica e multiobjetiva. A Tabela 2 ressalta ainda, adicionalmente, uma rica variedade de formulações inéditas ou quase, com escassa citação na literatura ou que nunca foram abordadas. Tal informação aponta assim diversos desafios para futuras pesquisas. Com exceção do problema 4 (projeto de controladores via diagramas de Bode), todos os demais problemas da taxionomia aqui apresentada foram explorados, com sucesso, utilizando o conceito de um protótipo computacional experimental customizado (isto é, baseado em um “cardápio de opções”) para a escolha de diferentes tipos de funções objetivo, variáveis de controle, restrições, modelagens dinâmica e estática detalhada de componentes (geradores, controladores, rede), e sobretudo diferentes tipos de estratégias de otimização matemática (clássicas e via meta-heurísticas). Essa evidência indica a viabilidade, utilidade e eficácia que se pode esperar de um futuro desenvolvimento comercial do conceito aqui descrito, para o tratamento da segurança do sistema de energia de um país. Por último, cabe novamente enfatizar o aspecto

flexível desta proposta, onde problemas de importância porventura aqui não mencionados podem ser habilmente inseridos em adaptações evolutivas da taxionomia preliminar aqui adiantada.

3.0 - OTIMIZAÇÃO BASEADA EM META-HEURÍSTICAS

Dada a diversidade de problemas passíveis de inserção na taxionomia usada, argumenta-se que a possibilidade de sucesso da estratégia adotada será maior se, para cada problema formulado, puderem ser escolhidas diferentes alternativas de metodologias de otimização a partir de um amplo menu de opções. Com esse propósito em vista, a lista preliminar de meta-heurísticas selecionadas para uso nos testes iniciais dos problemas de segurança investigados foi a seguinte: *TB-Busca Tabu* [13,14]; *GRASP-Procedimento de Busca Gulosa Adaptativa Aleatória* [15]; *LUDE-Evolução Diferencial de Alinhamento* [16]; *PSO-Otimização via Enxame de Partículas* [17]. Futuras versões do protótipo desenvolvido poderão incluir outras técnicas de otimização, caso conveniente. Um grande número de experimentos foi realizado envolvendo as nove funções mono-objetivas das Tabelas 1 e 2 e as quatro meta-heurísticas inicialmente disponibilizadas. Com base nesses testes preliminares [1], optou-se posteriormente, por motivo de economia, pela manutenção de apenas duas meta-heurísticas no protótipo computacional desenvolvido, a saber, *LUDE* e *PSO*. Cabe aqui adiantar que a técnica *PSO* gerou bons resultados em todos os 31 experimentos nas quais foi utilizada [1]. No que concerne os cinco problemas multiobjetivos também formulados, os mesmos foram intencionalmente limitados à consideração simultânea de no máximo duas funções objetivo (*i.e.* problema biobjetivos). Neste caso, foi utilizada tão-somente a técnica de otimização de Pareto [18], que investiga a mínima distância $Dist^i$ calculada pela Eq.(1), pictoricamente ilustrada na Figura 1 para o caso bidimensional e que admite uma simples extensão para quantas dimensões forem desejadas.

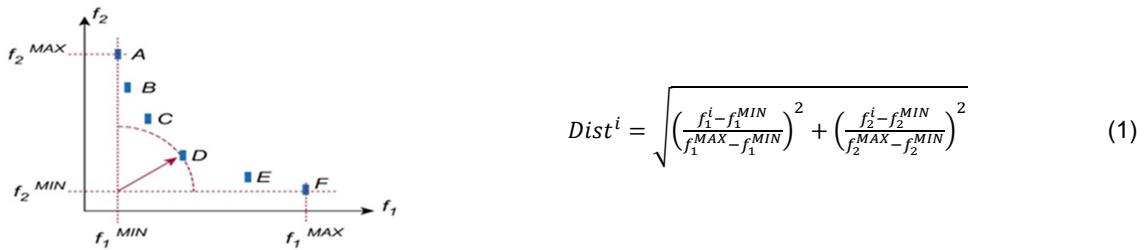


Figura 1 – Solução Pareto para problemas biobjetivos [18].

4.0 - APLICAÇÕES DA TAXIONOMIA: DUAS NOVAS FORMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA

É sabido que os problemas de otimização da segurança dinâmica de sistemas de potência demandam alta capacidade de processamento computacional. Na tentativa de superar essa dificuldade, diversas propostas de ataque ao problema [5] propõem o emprego de modelos dinâmicos simplificados. Embora essa alternativa possa gerar uma eventual redução no esforço e tempo computacional requeridos nas simulações, pode também produzir resultados sem a necessária precisão. Por este motivo, optou-se que o protótipo computacional construído deveria ofertar ao usuário uma ampla gama de modelos dinâmicos, conforme sua conveniência e as particularidades de cada problema. Assim, o programa disponibilizado permite uma escolha ampla que varia entre modelos de máquina de primeira ordem até modelos com dinâmica de quarta ou quinta ordem para máquinas de polos lisos ou salientes. Da mesma forma é disponibilizado um abrangente conjunto de tipos de reguladores de tensão no padrão IEEE, limitadores de sobre-excitação, estabilizadores (*PSS*) e reguladores de velocidade. O sistema de transmissão é modelado por uma matriz admitância nodal. As cargas são modeladas por admitâncias fixas adicionadas à matriz admitância nodal. Outros aspectos relativos à modelagem dinâmica aqui empregada estão registrados em [8]. Usando este ambiente computacional de alta flexibilidade contendo os modelos dinâmicos, as estratégias otimizantes mencionadas na seção 3 (*Lude*, *Swarm Particles*, *Pareto biobjetivo*) e a proposta de tipologia apontando os 15 problemas de segurança das Tabelas 1 e 2, diversos experimentos sobre otimização de segurança foram realizados [1], usando cinco sistemas-teste com 9, 33, 39, 65 e 4873 barras. Por limitação de espaço, nas seções subsequentes serão apresentados apenas as duas formulações originais, quais sejam: *i*) o problema # 8, caracterizado como determinístico, híbrido e biobjetivo, aplicado a um sistema de 33 barras; *ii*) o problema # 15, caracterizado como estocástico, sistêmico e mono-objetivo, aplicado a um sistema de 39 barras.

4.1 Exemplo: Otimização Determinística, Biobjetiva, Híbrida

Este experimento aborda o problema do estabelecimento da maximização dos fluxos entre áreas elétricas simultaneamente com a antagonista minimização das oscilações das tensões em um conjunto de barras especificadas. A formulação matemática do mesmo é expressa pelas Eqs. (2-8), onde *Amplitude (i,j)* indica a magnitude da oscilação de tensão na *i*-ésima barra devido a *j*-ésima contingência; *Nbarras* é o número de barras cujas tensões devem ser monitoradas conforme o critério do analista; *NCtg* é o número de contingências passíveis de ocorrência; *P_{mn}* é o fluxo ativo no circuito *m-n*; *Interligação* indica o conjunto de circuitos que caracteriza a definição de uma interligação entre áreas; *Pg(i)* and *Qg(i)* são as potências ativa e reativa despachadas pelo *i*-ésimo gerador; *NGenerators* é o número de geradores do sistema estudado; *V(k)* é a tensão da *k*-ésima barra; *MVA(n)* é o fluxo de potência no *n*-ésimo circuito; *NCircuits* é o número de circuitos monitorados; *VP(m)* é o valor numérico do parâmetro *m* do *PSS* a ser ajustado; *VP_{min}* and *VP_{max}* denotam os valores mínimo e máximo permitidos para cada parâmetro e *NParâmetros* é o número de parâmetros considerado em um dado *PSS*.

e

$$\begin{aligned} \text{Minimize: } & \text{Máxima(Amplitude}(i,j))i = 1, NBarras, j=1, NCtg & (2) \\ \text{Maximize: } & \Sigma P_{mn}, m - n \in \text{Circuitos das Interligações} & (3) \\ \text{sujeito a: } & P_{g_{Min}}(i) \leq P_g(i) \leq P_{g_{Max}}(i), i=1, Ngeradores & (4) \\ & Q_{g_{Min}}(i) \leq Q_g(i) \leq Q_{g_{Max}}(i), i = 1, NGeradores & (5) \\ & V_{Min}(k) \leq V(k) \leq V_{Max}(k), k = 1, NBarras & (6) \\ & MVA(n) \leq MVA_{Max}(n), n = 1, NCircuitos & (7) \\ & VP_{Min}(m) \leq VP(m) \leq VP_{Max}(m), m = 1, NParâmetros & (8) \end{aligned}$$

A primeira função objetivo, Eq.(2), demanda a minimização da máxima amplitude de oscilação de tensão que é observada em todas as barras monitoradas, considerando todas as contingências simuladas para cada uma das soluções candidatas, sem violar o critério que estabelece a máxima magnitude permitida para a faixa de oscilação. A segunda função objetivo, Eq. (3), impõe a maximização da soma de todos os fluxos de potência ativos passantes em todos os circuitos que uma interligação entre áreas elétricas distintas. O problema é determinístico porque nenhuma incerteza é modelada, e biobjetivo porque procura-se a ocorrência de dois conflitantes objetivos simultaneamente. O problema é classificado como híbrido porque combina um conjunto de restrições sistêmicas globais e restrições relacionadas com um dado PSS local. Sua solução de otimização foi alcançada usando-se a técnica de obtenção de uma frente de Pareto construída com o auxílio de um algoritmo de geração de enxame de partículas (PSO). Foi utilizada uma população com 20 elementos, sendo necessário 20 iterações para obter o resultado. O sistema-teste empregado tem 33 barras (vide Figura 2), com 2 áreas elétricas, 7 geradores, 9 cargas, 26 linhas de transmissão e 7 transformadores. Todos os dados do sistema podem ser encontrados nos Apêndices E e F de [1]. A barra 800 foi utilizada como barra de referência. A lista de contingências aplicadas é mostrada na Tabela 3.

Cada distúrbio aplicado foi dinamicamente simulado durante 5 segundos. Neste experimento, as oscilações de

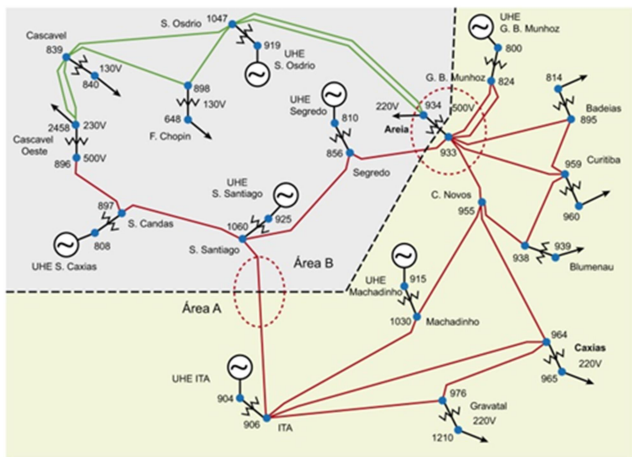


Figura 2 – Sistema-teste equivalente Sul-Brasileiro [1].

TABELA 3 - CONTINGÊNCIAS SELECIONADAS P/ O SISTEMA-TESTE (33 BARRAS)

Eventos	Curto-Circuito			Circuitos (500 kV)	Abertura (ms)
	Reator MVA	Início (ms)	Fim (ms)		
1	5000	200	300	933 Areia-856 Segredo	300
2	5000	200	300	995 Itá-1060 S.Santiago	300
3	5000	200	300	995 Itá-964 Caxias	300

TABELA 4 - MAXIMIZANDO O AMORTECIMENTO SISTÊMICO E O FLUXO NA INTERLIGAÇÃO

Sol	Iter	Tempo CPU (s)	Aptidão			K1	Geração na Barra P _g (MW)					
			Distância Euclidiana	V Osc (%)	Fluxo MW		# 808	# 810	# 904	# 915	# 919	# 925
#1	1	3,38	0,48	0,22	-1223	40	540	31	1375	122	716	842
2	1	4,15	1,00	0,42	-852	7	414	816	1140	719	484	25
3	2	6,24	1,00	0,08	-2341	28	445	933	635	643	728	1157
4	2	9,15	0,72	0,13	-1904	35	615	913	769	180	578	704
5	10	38,82	0,70	0,20	-1764	34	759	498	1126	205	728	693
6	17	66,67	0,90	0,38	-1128	34	461	269	1230	565	728	573
Situação do Caso Base			1,25	-2569	4	1000	1000	400	400	700	800	

Notas: Sol = soluções, Iter = iterações, V Osc = faixa de oscilação das tensões, Fluxo = fluxo n/ interligação, K1 = ganho do PSS, P_g (MW) = geração d/ potência ativa n/ barra.

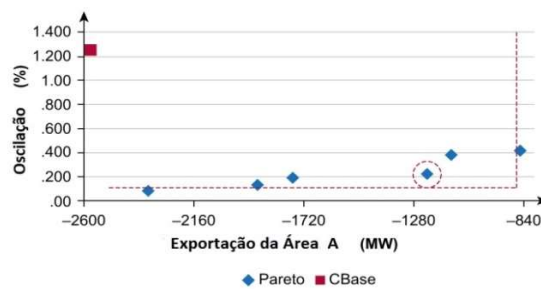


Figura 3 – Frente de Pareto: Δ (oscilações de tensão) vs. potência exportada da área A

tensão foram medidas em todas as barras do sistema 2 segundos após o restabelecimento da respectiva contingência. O fluxo total medido na interligação entre as áreas A e B (designado como "exportado" no sentido de A para B) foi definido como sendo a soma dos fluxos de potência em 2 linhas de 500-kV, (#995-#1060 e #933-#856), e o fluxo do transformador 500-345 kV na barra Areia (#933-#934). O valor numérico do fluxo na interligação na direção da área A para área B é dado como negativo (ou seja ocorre de B para A). Nesse experimento, a variável de controle modelada pela Eq. (8) é o parâmetro que representa o ganho K₁ do PSS ativado no gerador ligado na barra #904 (vide todos os dados na Figura F6 e Tabela F10 de [1]). Uma simulação foi processada e 6 soluções não dominantes caracterizam a frente de Pareto registrada na Tabela 4. O critério para a escolha da melhor solução foi baseado na mínima distância Euclidiana, como recomendado em [18], indicando

portanto que o primeiro resultado é o melhor, sendo a distância Euclidiana igual a **(0.48)**. Assim, essa solução estabelece o melhor equilíbrio compondo o atendimento às duas funções objetivo antagônicas e é pictoricamente indicada pelo círculo na Figura 3. É evidente que todas as soluções (*i.e.* os pontos de operação) que compõem a frente de Pareto obtida têm melhor qualidade do que o ponto de operação inicial tomado do caso-base, tanto do ponto de vista da capacidade de amortecimento como do nível de fluxo injetado na interligação (compare o ponto de operação inicial, indicado na Figura 3 pelo pequeno quadrado, com todos os demais 6 pontos da frente de Pareto, representados por pequenos losangos). Porém é aqui crucial observar que, para interpretar corretamente a Eq. (1), é inicialmente necessário normalizar ambas as escalas, ordenadas e abscissas, pois as mesmas representam variáveis de naturezas distintas. Alerta-se então que a inspeção visual direta da Figura 3, sem o cuidado da normalização prévia, pode levar o analista a um julgamento equivocado. Também deve ser ressaltado que nesse exemplo específico, o valor numérico do fluxo considerado como exportado a partir da área A é negativo (ou seja, o que importa é o módulo da grandeza e não sua direção).

4.2 Exemplo: Otimização Estocástica, Mono-objetiva, Sistêmica

Este segundo exemplo apresenta uma formulação inédita que possibilita a obtenção de um ponto de operação no entorno do ótimo, associado à segurança dinâmica global do sistema, considerando a presença de incertezas. Este ponto de operação materializa-se pela definição do melhor despacho de potência ativa possível sob o ponto de vista da segurança, obtido através da minimização de um novo indicador proposto [11], denominado *Índice de Estabilidade Aparente (IEA)*. Este índice fundamenta-se no conceito de margem de estabilidade. Em geral, as margens de estabilidade de um sistema de potência expressam a que “distância” o sistema encontra-se da situação de estabilidade/instabilidade. Essa grandeza é obtível pelo denominado método da máquina equivalente (*SIME* - “*single machine equivalent*”) e resulta da generalização do conceito de “máquina contra barra infinita” (*OMIB* - “*one machine infinite bus*”) e da aplicação do critério das áreas iguais. O método *SIME*, aqui utilizado para obter o *IEA*, baseia-se em um *OMIB* generalizado, tratando-se portanto de um método híbrido, temporal-direto. Consoante a taxionomia de referência, essa aplicação é classificada como mono-objetiva e sistêmica, porque obviamente trata da minimização de uma única função objetivo que envolve as potências ativa e reativa despachadas por cada gerador (P_g, Q_g) e as tensões nas barras (V), caracterizando então uma abrangência sistêmica. É também estocástica, porque a formulação do *IEA* considera ampla gama de incertezas associadas com os modos de intercâmbio entre as áreas do sistema, a topologia da rede, patamares de carga, tipos, durações e locais dos defeitos (cinco tipos de defeitos são modelados, incluindo curto-circuitos francos monofásicos, bifásicos e trifásicos, curtos fase-fase e abertura de linhas) e probabilidade de sucesso na atuação da proteção. O indicador *IEA* é um número adimensional dado pela Eq. (9):

$$IEA = -\sqrt{E(M_1)^2 + E(M_2)^2} \quad (9)$$

onde $E(M)$ é o módulo das expectâncias das margens negativas do Tipo 1 (M_1) e Tipo 2 (M_2) (vide [11], [19]). Uma margem negativa do Tipo 1 é definida pela equação (2.19) da referência [19], sendo expressa em ($MW.rd$). Para esclarecer o outro tipo de margem, é conveniente repetir que o conceito de margem de estabilidade exprime a “distância” de um sistema a uma zona de instabilidade. Entretanto, durante circunstâncias de extrema severidade, a margem de estabilidade baseada no critério de áreas iguais generalizado [19] pode revelar-se inexistente devido às seguintes condições: *i*) as curvas representando as potências elétrica e mecânica não têm intersecção; ou *ii*) o ângulo do rotor associado com a eliminação do defeito está além do ângulo que define a instabilidade. Quando uma dessas condições aparece, uma margem negativa Tipo (2) é definida [11] em (MW). Ela é dada pelo valor mínimo da potência acelerante P_a que ocorre durante o período transitório do sistema, expressa pela Eq. (10), onde M é o coeficiente de inércia de um sistema *OMIB* generalizado e δ é o ângulo do rotor [11],[19-28]. Quando dois valores de *IEA* são comparados, a condição de maior segurança é aquela associada ao menor módulo, o que reflete a menor magnitude composta de ambas as margens negativas dos tipos 1 e 2, conforme indicado pela Eq. (9). Durante a simulação dinâmica, como não é possível saber antecipadamente que tipo de margem (Tipo 1 ou Tipo 2) será encontrada, a formulação expressa pela Eq. (9) fica justificada porque captura as duas possibilidades em um único indicador que permite inferir a situação mais segura.

$$P_a = P_{mecânica} - P_{elétrica} = M \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (10)$$

Para este experimento, um outro índice probabilístico, também inédito [11], é definido. Trata-se da *Probabilidade de Ocorrência de Instabilidades (POI)*, que reflete o número de estados instáveis, sem entretanto discriminar entre a gravidade de cada situação. É portanto um mero “contador” de situações instáveis. Sua formulação é dada pela Eq. (11), onde P_{estado} é a probabilidade do *i*-ésimo estado monitorado caracterizar-se como instável, e Ψ representa o conjunto de todos os estados instáveis.

$$POI = \sum P_{estado}(i), \quad i \in \Psi \quad (11)$$

A formulação matemática desse novo problema é dada pelas Eqs. (4-7) e (12), e a solução numérica foi obtida usando uma otimização baseada em enxame de partículas (*PSO*) com população de 10 indivíduos e 10 iterações. Utilizou-se o sistema acadêmico New England mostrado na Figura 4, contendo 3 áreas, 39 barras, 10 geradores e 46 ramos (sendo 34 linhas de transmissão e 12 transformadores), [29], [30]. Todos os dados adicionais utilizados podem ser vistos em [10], [11].

$$\begin{aligned} &\text{Minimize: } IEA(\bar{P}_g, \bar{V}) \\ &\text{sujeito a: } Eqs.(4-7), \text{ definidas como acima.} \end{aligned} \quad (12)$$

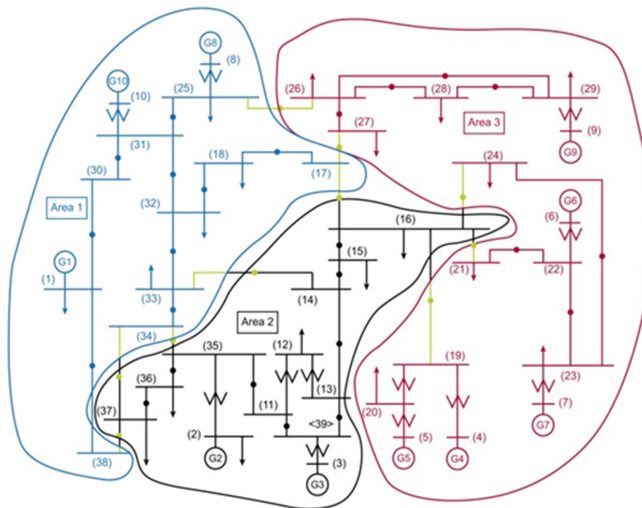


Figura 4 – Sistema-teste New England - 39 barras [29],[30].

Nesse exemplo a simulação foi realizada considerando que o distúrbio tratado é a ocorrência de um curto-circuito trifásico franco com duração de 80 ms em um dos terminais de cada uma das 34 linhas de transmissão. Cada simulação foi processada por 5 segundos. Além disso, para cada cenário de defeito três possibilidades foram também investigadas: *i*) o religamento da linha após o defeito não é permitido; *ii*) religamento tripolar com sucesso, decorridos 250 ms após a eliminação do defeito; *iii*) religamento sem sucesso ocorre e decorridos 250 ms após a tentativa fracassada, outro curto-circuito trifásico franco com duração de 80 ms ocorre. O experimento exige portanto o processamento de $3 \times 34 = 102$ simulações eletromecânicas com modelagem dinâmica detalhada [8]. Como a metodologia de otimização avalia uma população de 10 candidatos em cada uma das 10 iterações, são necessárias $102 \times 10 \times 10 = 10\,200$ simulações dinâmicas para a obtenção da solução final. No caso em apreço, o tempo gasto usando um processador de 3 GHz e 3.25 GB RAM atingiu 0,78 segundos/simulação. Dado que a influência das incertezas é um dos aspectos cruciais desse tipo de investigação, quatro diferentes experimentos (E) foram realizados com hipóteses distintas, quais sejam: *i*) **E1**: IEA calculado considerando que todos os defeitos são equiprováveis (veja Tabela 5) e o religamento pós-defeito não é permitido. Este primeiro experimento é importante porque seu resultado é totalmente equivalente a um tratamento puramente determinístico, onde implicitamente se emprega uma distribuição equiprovável com probabilidade igual a $1/34 = 0.02941$; *ii*) **E2**: nesse experimento as probabilidades dos defeitos são proporcionais aos respectivos comprimentos das linhas de transmissão (vide Tabela 5), o que representa uma situação mais realista que a anterior. Nesse caso o religamento pós-defeito também não ocorre. A estimativa aproximada dos comprimentos l das linhas de transmissão é baseada na equação $l = 7.8 (X.B)^{1/2}$, onde X representa a reatância da linha em % e B representa a susceptância da linha em $Mvar$ [3]; *iii*) **E3**: idêntico ao experimento **E2** porém assumindo que sempre ocorrem religamentos pós-defeito exitosos; *iv*) **E4**: também idêntico ao experimento **E2**, porém considerando que apenas 80% dos religamentos pós-defeito têm sucesso. Convém aqui lembrar que quando dois valores de IEA são comparados, a condição de maior segurança dinâmica está associada ao índice com menor magnitude, refletindo menores valores das expectativas das margens de estabilidade negativas dos Tipos 1 e 2, como indicado na Eq. (9). Os resultados dos 4 experimentos são apresentados na Tabela 6. O primeiro aspecto a ser observado é a confirmação da grande importância da representação de incertezas em estudos de segurança dinâmica. Este fato fica evidenciado quando os experimentos **E1** e **E2** são comparados, até mesmo antes do processo de otimização ser aplicado (veja o caso de referência na Tabela 6). O efeito dos religamentos com e sem sucesso são evidenciados através dos experimentos E3 e E4. O experimento **E1**, baseado na hipótese de que a chance de ocorrência de um defeito nas linhas de transmissão é igual para todas as linhas (e que portanto é equivalente ao tradicional tratamento determinístico), fornece um $||IEA|| = + 53.80$, enquanto o experimento **E2**, que é mais realista por admitir que a probabilidade de ocorrência de defeitos em linhas mais longas pode ser maior, gera um $||IEA|| = + 57.83$. Conclui-se que o tratamento determinístico, ao ignorar as incertezas de ocorrência dos defeitos e gerar um valor mais baixo de IEA, pode mascarar o real perigo incorrido no sistema. Como já foi esclarecido, defeitos menos severos produzem margens de estabilidade negativa com menores valores. Assim, é aparente que os defeitos que ocorrem no experimento **E2** geram margens de estabilidade negativa maiores. Essa afirmação é comprovada pela Figura 5, onde se observa que no experimento **E2** (para cada par de barras, a barra da direita está relacionada a **E2** enquanto a barra da esquerda a **E1**) ocorre um impactante defeito que gera uma alta expectativa de margem negativa na faixa entre -5 e -50 MW. Outro aspecto a ser destacado pela análise da Tabela 6 é que o processo de otimização se revelou eficiente nos quase experimentos conduzidos, já que na coluna que registra as melhores soluções, pode-se notar que para quase todos os resultados, os valores dos índices IEA e POI apresentam-se menores do que aqueles da coluna de referência. A única e interessante exceção está na melhor solução encontrada no experimento **E4** no que concerne o índice POI. Nesse caso, o valor $POI = 0.61940$ indica que o conjunto de despachos que é obtido pelo processo de otimização, acaba gerando um maior número de casos instáveis. Entretanto, o menor valor do $||IEA||$ (igual a **+8.93**) indica que condição obtida para a segurança da

operação pós-otimizada é mais robusta do que aquela vigente no caso base original, com um $\|IEA\| = + 21.96$. Essa curiosa situação sugere uma outra futura investigação original e mais avançada, tratando agora de uma formulação biobjetiva, sistemática e estocástica envolvendo simultaneamente os indicadores IEA e POI. Os resultados dos experimentos são complementados pela Tabela 7, de cunho prático, onde são registrados os valores de despachos de potência ativa para os dez geradores do sistema, tanto para o caso base (antes da otimização da segurança), quanto para a situação operativa após o procedimento de otimização da segurança.

TABELA 5 - SISTEMA NEW ENGLAND: PROBABILIDADES DE DEFEITO NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

Contingência	Da Barra	P/ Barra	Barra c/ Defeito	Probabilidade defeito (%)	
				Equiprovável	Proporcional
1	30	31	30	0.02941	0.06915
2	30	1	30	0.02941	0.05588
3	31	32	31	0.02941	0.02543
4	31	25	31	0.02941	0.01446
5	32	33	32	0.02941	0.02802
6	32	18	32	0.02941	0.02176
7	33	34	33	0.02941	0.01691
8	33	14	33	0.02941	0.01723
9	34	35	34	0.02941	0.00433
10	34	37	34	0.02941	0.01659
11	35	36	35	0.02941	0.01316
12	35	11	35	0.02941	0.01377
13	36	37	36	0.02941	0.00773
14	37	38	37	0.02941	0.04795
15	38	1	38	0.02941	0.07068
16	39	11	39	0.02941	0.00723
17	39	13	39	0.02941	0.00723
18	13	14	13	0.02941	0.01702
19	14	15	14	0.02941	0.03637
20	15	16	15	0.02941	0.01636
21	16	17	16	0.02941	0.01410
22	16	19	16	0.02941	0.03142
23	16	21	16	0.02941	0.02393
24	16	24	16	0.02941	0.00817
25	17	18	17	0.02941	0.01342
26	17	27	17	0.02941	0.03044
27	21	22	21	0.02941	0.02445
28	22	23	22	0.02941	0.01718
29	23	24	23	0.02941	0.04587
30	25	26	25	0.02941	0.05253
31	26	27	26	0.02941	0.02422
32	26	28	26	0.02941	0.07848
33	26	29	26	0.02941	0.10349
34	28	29	28	0.02941	0.02502

TABELA 6 - PROBABILIDADE DE INSTABILIDADE (POI) E ÍNDICE DE ESTABILIDADE APARENTE (IEA)

	Experimento		Caso Referência		Melhor Solução	
	Tipo de Incerteza	Religamento	POI	$\ IEA\ $	POI	$\ IEA\ $
E1	equiprovável	não	0,20587	53,80	0,11764	0,33
E2	proporcional	não	0,29142	57,83	0,12351	1,54
E3	proporcional	sim, sucesso	0,05644	13,58	0,02445	2,52
E4	proporcional	sim, insucesso	0,16025	21,96	0,61940	8,93

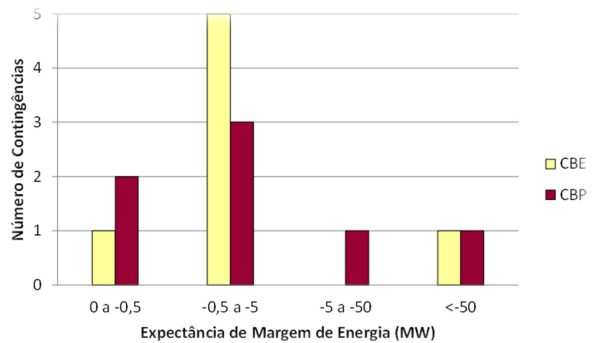


Figura 5 – Expectância de Margem de Energia p/ Distribuição Equiprovável (CBE) e Proporcional (CBP)

TABELA 7 - MELHOR DESPACHO P/ SEGURANÇA DINÂMICA CONSIDERANDO INCERTEZAS

	Despachos dos Geradores (MW)										Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Ref	1000	520	650	632	508	650	560	540	830	250	6140
E1	1900	443	900	500	200	700	500	100	700	200	6143
E2	1739	125	800	zero	600	400	300	1000	700	500	6164
E3	1300	345	400	100	300	900	600	700	600	900	6145
E4	2000	547	400	300	900	800	400	400	300	100	6147

Notas: Ref: Despachos dos geradores p/ o caso de referência; E1,2,3,4: Despachos dos geradores para cada experimento considerando incertezas.

5.0 - CONCLUSÃO

Este artigo apresentou o conceito de uma abrangente e flexível taxionomia capaz de incorporar um amplo conjunto de relevantes problemas (tanto inéditos quanto clássicos) associados à melhoria da segurança de sistemas de potência, sob o ponto de vista de uma modelagem dinâmica rigorosa. O foco do trabalho é a possibilidade de procura de uma melhor condição operativa ao invés da busca de um ótimo global, cuja determinação pode ser muito custosa e de difícil alcance. Essa decisão se baseia na experiência que mostra ser mais recomendável a rápida obtenção de uma melhor condição operativa do que o dispêndio de grandes esforços para o alcance do ponto de operação globalmente ótimo, que amiúde pouco se diferencia de uma melhor solução encontrada. *Entre as principais contribuições relevantes do artigo, pode-se citar: a proposição de uma nova taxionomia de grande utilidade prática para o tratamento de uma ampla gama de problemas (clássicos e inéditos) de segurança dinâmica de sistemas de potência modelada de forma minuciosa; a abordagem envolvendo o uso combinado e flexível de várias meta-heurísticas robustas e simulações eletromecânicas completas, visando a obtenção de soluções que sejam, separada ou simultaneamente, adequadas sob os pontos de vista global e local; a formulação de um inédito problema de otimização global da segurança dinâmica do sistema de potência que considera a representação de incertezas, de forma inovadora e eficaz; a introdução da melhoria da segurança dinâmica de sistemas de potências considerando formulações multiobjetivas originais e a identificação de diversos novos problemas merecedores de investigações.*

6.0 - AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem o apoio do Dr. Jorge Luis de Araújo Jardim (HPPA), o suporte do CNPq e a revisão gramatical e ortográfica da Sra. Solimeire L. O. Schilling.

7.0 - REFERÊNCIAS

- [1] da Silva Neto C.A., *Otimização da Segurança de Sistemas de Potência via Metaheurísticas e Simulação Dinâmica Completa*, Tese D.Sc., Universidade Federal Fluminense (IC/UFF), Niterói, Brasil, Julho, 2012, [Online] Available : <http://www2.ic.uff.br/PosGraduacao/Teses/544.pdf>
- [2] Heydt G.T., "Multiobjective optimization: an educational opportunity in power engineering", *IEEE Trans. on PWRS*, vol. 24, no. 3, pp. 1631-1632, Aug 2009.

- [3] Schilling M.Th., Souza J.C.S., Couto Filho M.B., "Power system probabilistic reliability assessment: current procedures in Brazil," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 868-876, Aug 2008.
- [4] Li W., *Risk Assessment of Power Systems: Models, Methods, and Applications*. New York: IEEE Press, 2005.
- [5] Schilling M.T., Billinton R., Groeters dos Santos M., "Bibliography on power systems probabilistic security analysis 1968-2008", *Int. J. of Emerging Electric Power Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 1-48, Jun 2009, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Marcus_Schilling/publications?sorting=title&page=2
- [6] Yorino N., Abdillah M., Sasaki Y., Zoka Y., "Robust power system security assessment under uncertainties using bi-level optimization", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 352-362, Jan 2018.
- [7] Hasan K.N., Preece R., Milanović J.V., "Existing approaches and trends in uncertainty modelling and probabilistic stability analysis of power systems with renewable generation", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 101, pp.168-180, Mar 2019.
- [8] Jardim J.L.A., *Advances in Power System Transient Stability Assessment Using Transient Energy Function Methods*, Ph.D. Thesis, U. of London, UK, 1994.
- [9] Jardim J.L.A., Cory B., Martins N., "Efficient transient stability assessment using transient energy function", in *Proc. Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Trondheim, Norway, pp. 1-8, 1999.
- [10] Takahata A.Y., *Segurança de Sistemas de Potência sob Pequenas Perturbações Considerando Incertezas*, Tese D.Sc., COPPE/UFRJ, Dept. Eng. Elétrica, Rio de Janeiro, Brasil, Maio, 2008. [Online]. Available: <http://pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2008050901.pdf>
- [11] dos Santos M.G., *Segurança de Sistemas de Potência em Regime Transitório Considerando Incertezas*, Tese D.Sc., Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, Brasil, Dezembro, 2009. [Online] Available: <http://www.ic.uff.br/index.php/pt/pos-graduacao/teses-e-dissertacoes>
- [12] Takahata A.Y., Groeters dos Santos M., Taranto G.N., Schilling M.T., "Computational framework combining static and transient power security evaluation using uncertainties", *Int. Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 71, pp. 151-159, Oct 2015.
- [13] Glover F., "Tabu search Part I", *ORSA J. on Computing*, vol.1, pp.190-206, 1989.
- [14] Glover F., "Tabu search Part II", *ORSA J. on Computing*, vol.2, pp.4-32, 1990.
- [15] Feo T.A., Resende M.G.C., "Greedy randomized adaptive search procedure", *J. of Global Optimization*, vol.6, pp.109-133, 1995.
- [16] Sarimveis H., Nikolakopoulos A., "A line up evolutionary algorithm for solving nonlinear constrained optimization problems", *Computers & Operations Research*, vol. 32, no.6, pp.1499-1514, 2005.
- [17] Kennedy J., Eberhart R., "Particle swarm optimization", *Proc. IEEE Int. Conf. on Neural Networks*, vol.4, pp.1942-1948, Nov/Dec, 1995.
- [18] Climaco J., Antunes J., Martins A., Almeida A., "A multiple objective linear programming model for power generation expansion planning", *Int. J. of Energy Research*, vol.19, pp.419-432, 1995.
- [19] Pavella M., Ernst D., Ruiz-Veja D., *Transient Stability of Power Systems – A Unified Approach To Assessment And Control*. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [20] Xue Y., Van Cutsem Th., Ribbens-Pavella M., "A simple direct method for fast transient stability assessment of large power systems", *IEEE Trans. on PWRs*, vol. 3, no.2, pp. 400-412, May 1988.
- [21] Xue Y., Van Cutsem Th., Ribbens-Pavella M., "Extended equal area criterion justifications, generalizations, applications", *IEEE Trans. on PWRs*, vol. 4, no. 1, pp. 44-52, Feb 1989.
- [22] Rahimi F.A., "Generalized equal-area criterion: a method for on-line transient stability analysis", in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics*, Los Angeles, California, pp. 684-688, Nov 1990.
- [23] Xue Y., Pavella M., "Critical cluster identification in transient stability studies", *IEE Proceedings-C*, vol.140, no.6, pp. 481-486, Nov 1993.
- [24] Xue Y., Rousseaux P., Wehenkel L., Gao Z., Pavella M., Trotignon M., Duchamp A., Heilbronn B., "Dynamic extended equal-area criterion. part ii: recent extensions", in *Proc. of Athens Power Tech, NTUA-IEEE/PES Joint Int. Power Conf.*, Sep 1993.
- [25] Chiodo E., Lauria D., "Transient stability evaluation of multimachine power systems: a probabilistic approach based upon the extended equal area criterion", *IEE Proc. in Gen., Trans. and Dist.*, vol. 141, no. 6, pp. 545-553, Nov 1994.
- [26] Ferreira C.M.M., Dias Pinto J.A., Barbosa F.P.M., "Dynamic security analysis of an electric power system using a combined Monte Carlo-hybrid transient stability approach", in *Proc. of IEEE Porto Power Tech Conf.*, vol. 2, Porto, Portugal, 10-13 Sep 2001.
- [27] Pizano-Martinez A., Fuerte-Esquivel C.R., Ruiz-Veja D., "Global transient stability-constrained optimal power flow using the SIME method", in *Proc of IEEE Power & Energy Soc. Gen. Meeting*, Calgary, Canada, pp.1-8, 26-30 Jul 2009.
- [28] Tan H.-M., Vowles D.J., Zivanovic R., "Implementation of the enhanced binary-SIME method for finding transient stability limits with PSS/ETM", in *Proc. of IEEE Bucharest Power Tech Conf.*, Bucharest, Romania, pp. 1-8, Jun 28th-Jul 2nd 2009.
- [29] Athay T., Podmore R., Virmani S., "A practical method for direct analysis of transient stability", *IEEE Trans. on PAS*, vol. 98, no.2, pp. 573-584, Mar/Apr 1979.
- [30] Pai M.A., *Energy Function Analysis for Power System Stability*. Boston/Dordrecht/London: Kluwer Acad. Publ., Appendix A, pp.223-227, 1989.
- [31] Li H. *et alii*, "Stochastic stability analysis of power system with losses", *Energies*, 11 (678), pp.1-11, Mar 2018, (open access MDPI), DOI:103390/en11030678.



Carlos Alberto da Silva Neto nasceu em Pernambuco em 16 de agosto de 1962. Graduação (UFRJ, 1984), M.Sc. (COPPE / UFRJ, 1999), D.Sc. (Universidade Federal Fluminense, 2012), em Engenharia Elétrica.

Engenheiro registrado (EA, Brasil). Trabalhou em Furnas (Brasil) e British Columbia Hydro (Canada). Trabalha no ONS (Brasil) como *Especialista I* na área de dinâmica e desenvolvimento do programa ORGANON, em parceria com a empresa HPPA.

C-ele: casneto2002@yahoo.com.br



Marcelos Groeters dos Santos nasceu no Rio de Janeiro em 12 de julho de 1956. Graduação (UFRJ, 1982), M.Sc. (UNIFEI, 1995), D.Sc. (Universidade Federal Fluminense, 2009), em

Engenharia Elétrica. Engenheiro registrado (CREA, Brasil). Trabalhou no Cepel, Eletrobrás, Universidade Veiga de Almeida (Brasil) e Escuela Superior Politécnica del Litoral (Guayaquil, Equador). Foi Gerente no ONS (Brasil) onde tem o posto de *Especialista I*.

C-ele: m.groetaers@hotmail.com



Marcus Theodor Schilling Rio de Janeiro 18 de julho de 1951. Graduação (PUC-Rio, 1974), M.Sc., D.Sc. (COPPE/UFRJ, 1979, 1985), Engenharia Elétrica. Registro (CREA, Brasil), (P.-Eng., PEO, Canada). Trabalhou em

Furnas, PUC-Rio, Eletrobrás (Brasil), Universität Dortmund, (Alemanha), Ontario Hydro (Canada). Professor Titular, Depto. de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Fluminense (1994-2011). Foi Coordenador do Subgrupo de Confiabilidade (SGC/GTCP/GCPS, Eletrobrás), Gerente da Divisão de Estudos Elétricos (Eletrobrás). Membro Titular da Academia Nacional de Engenharia, ANE (2016), IEEE Life-Fellow (2017).