

CARLOS FRANCISCO SABILLÓN ANTÚNEZ

**ALOCAÇÃO ÓTIMA DE EQUIPAMENTOS SVC E TCSC NA REDE DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.**

Ilha Solteira
2014



CARLOS FRANCISCO SABILLÓN ANTÚNEZ

**ALOCAÇÃO ÓTIMA DE EQUIPAMENTOS SVC E TCSC NA REDE DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Câmpus de Ilha Solteira - UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Especialidade: Automação.

Prof. Dr. Marcos Julio Rider Flores
Orientador

Ilha Solteira

2014



FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

A636a Antunez, Carlos Francisco Sabillon .
Alocação ótima de equipamentos SVC e TCSC na rede de transmissão de energia elétrica. / Carlos Francisco Sabillon Antunez. -- Ilha Solteira: [s.n.], 24/02/2014
105 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 24/02/2014

Orientador: Marcos Julio Rider Flores
Inclui bibliografia

1. Alocação ótima . 2. Facts. 3. Psat. 4. Svc. 5. Tcsc.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Alocação ótima de equipamentos SVC e TCSC na Rede de Transmissão de Energia Elétrica

AUTOR: CARLOS FRANCISCO SABILLON ANTUNEZ

ORIENTADOR: Prof. Dr. MARCOS JULIO RIDER FLORES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica ,
Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. MARCOS JULIO RIDER FLORES
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. ANTONIO CÉSAR BALEEIRO ALVES
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação / Universidade Federal de Goiás

Data da realização: 24 de fevereiro de 2014.

À minha família, em especial aos meus pais Santiago e Mabel, aos meus irmãos Santiago e Andrés e a minha namorada Júlia, por todo amor, apoio, confiança e incentivo em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos a todos os familiares, amigos, professores e funcionários da FEIS-UNESP, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial, dedico meus agradecimentos:

- A Deus, por ter me dado força e saúde para chegar até aqui;
- Aos meus pais Santiago e Mabel e aos meus irmãos Santiago e Andrés pelo carinho, apoio e incentivo;
- À minha namorada Júlia pelo amor, apoio, confiança e incentivo em todos os momentos;
- Ao Prof. Dr. Marcos Rider, pelo apoio sempre incondicional, por todo ensinamento, incentivo, confiança e orientação;
- Ao Prof. Dr. Ruben Romero, por todo ensinamento, confiança, pelo acompanhamento nas bancas examinadoras, sugestões e incentivo;
- Aos meus amigos e colegas do laboratório que de forma direta ou indiretamente me ajudaram;
- À Organização de Estados Americanos e ao Grupo COIMBRA pela oportunidade e apoio financeiro.

*“Nunca se
sabe.” José de la Paz
Herrera
‘Chelato Uclés’*

RESUMO

Esta pesquisa propõe uma nova abordagem para o problema de alocação ótima de dispositivos SVC (Static Variable Compensator) e TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator) no sistema de transmissão de energia elétrica. Desde o surgimento dos FACTS na década dos anos 70, estes dispositivos tornaram-se em uma importante ferramenta na solução dos problemas clássicos da transmissão. Os FACTS ajudam a aumentar a capacidade de controle de fluxo ao longo das linhas e, ao mesmo tempo, a aumentar a estabilidade do sistema. Assim, estes dispositivos podem ajudar a aumentar a transmissão máxima de potência entre as regiões do sistema e também ajudar na estabilidade dinâmica do sistema. Conhecer os benefícios que os FACTS fornecem ao sistema de transmissão é importante para otimizar esse aprimoramento. Várias características devem ser levadas em consideração para encontrar um local ideal para um FACTS no sistema de transmissão, tais como: o tipo do dispositivo, o tamanho do dispositivo, a transmissão de potência do sistema e as violações dos limites de tensão e de potência reativa no sistema. Este trabalho aloca dois tipos de equipamentos FACTS, SVC e TCSC. No passado, diferentes abordagens têm sido desenvolvidas com o objetivo de alocar de forma otimizada FACTS em um sistema. Estas abordagens definem o local ótimo avaliando os benefícios, seja em regime permanente ou em estado transitório, que os FACTS proporcionam ao sistema. O objetivo e maior contribuição desta pesquisa é encontrar uma solução do problema de alocação ótima de SVCs e TCSCs que junte, avaliando em uma mesma função objetivo, tanto os benefícios no regime permanente, quanto os benefícios dinâmicos que o equipamento proporciona ao sistema em um determinado local. A função objetivo do modelo de otimização é calculada quando um dispositivo FACTS é instalado num local específico. Os critérios de otimização dependem do custo de geração total, das perdas totais, do custo do investimento e do aumento no máximo carregamento e na estabilidade transitória do sistema. PSAT, um toolbox de Matlab, é utilizado para executar as rotinas necessárias para avaliar a função objetivo. Uma meta-heurística é implementada para resolver o problema de alocação de FACTS em sistemas de transmissão. O algoritmo desenvolvido permite encontrar uma solução de boa qualidade com um baixo custo computacional. A metodologia é testada num sistema de nove barras e em um sistema de 39 barras, obtendo resultados satisfatórios.

Palavras-chave: Alocação Ótima. FACTS. PSAT. SVC. TCSC. Transmissão.

ABSTRACT

This research proposes a new approach for the problem of SVC and TCSC allocation in a transmission system. Since the rising of FACTS in the late 1970s, this type of devices had become a great tool in the search of solutions for the classic power transmission basic limitations. FACTS help to increase the controllability of flow over the lines and at the same time enhance the system stability. So, these devices can help in steady state augmenting the maximum power transfer among regions of the system and also, help in both the transient and dynamic stability of the system. Knowing the benefits that the FACTS provide to a transmission system, it is important to optimize this betterment. Several features must be taken into consideration to find an optimal location for FACTS in transmission systems such as device type, device size, total system power transfer and voltage and reactive power limit violations in the system. This work allocates two types of FACTS devices, the SVC (Static Variable Compensator) and TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator). In the past, different approaches have been developed aiming to optimally allocate FACTS in a system. These approaches define their optimal location evaluating the benefits in steady state or the stability enhancement that the FACTS provide to the system. The objective and greatest contribution of this research is to find a solution for the problem of «optimal location of FACTS» that joins, evaluating in one objective function, both the steady state benefits and the dynamic benefits that the device provide to the system in a specific location. The objective function of the optimization model is calculated when a FACTS device is installed in a specific location. Its optimization criteria depend on the overall generation cost, total system losses, investment costs, maximum loading and system's transient stability. PSAT, a Matlab toolbox, is used to run the routines necessary to evaluate the objective. A metaheuristic algorithm is implemented to solve the FACTS allocation in transmission systems problem. The developed algorithm permits to find a good quality solution with a low computation effort. The methodology is tested over 9-bus system, obtaining satisfactory results.

Keywords: FACTS. Optimal Location. PSAT. SVC. TCSC. Transmission.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Dispositivos FACTS convencionais controlados a tiristor.	24
Figura 2	SVC com bancos de capacitores chaveados a tiristor e bancos de reatores controlados a tiristor.	25
Figura 3	(a) SVC somente com bancos de capacitores chaveados a tiristor, (b) SVC com bancos de capacitores chaveados a tiristor e bancos de reatores controlados a tiristor e (c) SVC com bancos de capacitores, bancos de reatores e filtros.	26
Figura 4	Curva característica V-I do SVC.	27
Figura 5	(a) TCSC utilizando capacitores chaveados a tiristor e (b) TCSC utilizando um capacitor em paralelo com reatores controlados a tiristor.	28
Figura 6	Diagrama de blocos do algoritmo de otimização.	47
Figura 7	Diagrama de fluxo da fase de construção do indivíduo.	50
Figura 8	Diagrama de fluxo do ajuste local.	51
Figura 9	Regulador SVC Tipo 1.	57
Figura 10	Regulador TCSC.	59
Figura 11	Sistema teste de 9 barras.	61
Figura 12	Sistema teste New England de 39 barras.	62
Figura 13	Sistema teste 9 barras no PSAT	63
Figura 14	Gráfico das tensões caso base, sistema de 9 barras.	65
Figura 15	Falta # 1, sistema de 9 barras: Barra 5, Linha 5.	66
Figura 16	Falta # 2, sistema de 9 barras: Barra 7, Linha 4.	66
Figura 17	Falta # 3, sistema de 9 barras: Barra 4, Linha 5.	67
Figura 18	Falta # 4, sistema de 9 barras: Barra 6, Linha 3.	67
Figura 19	Gráfico das tensões caso base, sistema New England.	68

Figura 20	Falta # 1, sistema New England: Barra 15, Linha 20.	68
Figura 21	Falta # 2, sistema New England: Barra 17, Linha 26.	70
Figura 22	Falta # 3, sistema New England: Barra 9, Linha 14.	70
Figura 23	Falta # 4, sistema New England: Barra 21, Linha 27.	71
Figura 24	Falta # 5, sistema New England: Barra 27, Linha 31.	71
Figura 25	Gráfico das tensões caso 1.	72
Figura 26	Gráfico das tensões caso 2.	73
Figura 27	Falta # 1, sistema de 9 barras: Barra 5, Linha 5.	74
Figura 28	Falta # 2, sistema de 9 barras: Barra 7, Linha 4.	75
Figura 29	Falta # 3, sistema de 9 barras: Barra 4, Linha 5.	75
Figura 30	Falta # 4, sistema de 9 barras: Barra 6, Linha 3.	76
Figura 31	Gráfico das tensões no caso 3.	77
Figura 32	Falta # 1, sistema New England: Barra 15, Linha 20.	79
Figura 33	Diagrama de blocos da análise no domínio do tempo.	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Faixa dos parâmetros dos dispositivos utilizados.	30
Tabela 2	Formato de um individuo dentro do espaço de busca.	36
Tabela 3	Pacotes baseados em Matlab para a análise de sistemas elétricos de potência.	52
Tabela 4	Análises e características apresentadas na Tabela 3	53
Tabela 5	Fluxos de corrente nas linhas no caso base em módulo e expressas em p.u. no sistema de 9 barras.	65
Tabela 6	Fluxos de corrente no caso base, sistema NE.	69
Tabela 7	Fluxos de corrente nas linhas no caso 1.	73
Tabela 8	Fluxos de corrente nas linhas no caso 2.	74
Tabela 9	Fluxos de corrente nas linhas no caso 3.	78
Tabela 10	Formato de dados das barras.	84
Tabela 11	Formato de dados das linhas.	84
Tabela 12	Formato de dados da barra de referencia.	85
Tabela 13	Formato de dados dos transformadores.	85
Tabela 14	Formato de dados das barras PV.	86
Tabela 15	Formato de dados das barras PQ.	86
Tabela 16	Formato de dados das cargas em derivação (<i>shunt</i>).	86
Tabela 17	Formato de dados da oferta.	87
Tabela 18	Formato de dados da demanda.	87
Tabela 19	Formato de dados das faltas.	88
Tabela 20	Formato de dados das chaves (<i>breakers</i>).	88
Tabela 21	Formato de dados do SVC.	88

Tabela 22	Formato de dados do TCSC.	89
Tabela 23	Formato de dados da máquina síncrona.	90

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
1.2	OBJETIVO E DESCRIÇÃO DO TRABALHO	20
2	OS DISPOSITIVOS FACTS	22
2.1	JUSTIFICATIVA E HISTORIA DOS FACTS	22
2.2	CONTROLADORES FACTS	23
2.2.1	O compensador estático de reativos (SVC)	24
2.2.2	O compensador série controlado a tiristor (TCSC)	27
2.3	VANTAGENS E DESVANTAGENS	29
2.4	MODELAMENTO MATEMÁTICO	30
2.4.1	SVC	30
2.4.2	TCSC	31
3	O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE SVCs E TCSCs	32
3.1	ALOCAÇÃO ÓTIMA DE DISPOSITIVOS FACTS	32
3.2	MODELO, CONSIDERAÇÕES E HIPÓTESE	32
3.2.1	Modelo	33
3.2.2	Codificação	35
3.2.3	Hipótese	35
3.3	METODOLOGIA (META-HEURÍSTICA)	36
3.3.1	Embasamento Teórico	36
3.3.1.1	<i>Heurísticas</i>	37
3.3.1.2	<i>Meta-heurísticas</i>	37

3.3.1.3 Principais Meta-heurísticas	38
3.3.2 GRASP	41
3.3.3 Estrategia Fundamental	44
<i>3.3.3.1 Fase Preliminar</i>	<i>45</i>
<i>3.3.3.2 Pré-processamento</i>	<i>45</i>
<i>3.3.3.3 Fase Construtiva</i>	<i>46</i>
<i>3.3.3.4 Ajuste Local</i>	<i>48</i>
<i>3.3.3.5 Fase Final</i>	<i>48</i>
3.4 FERRAMENTAS (PSAT)	52
3.4.1 PSAT	52
<i>3.4.1.1 PF</i>	<i>54</i>
<i>3.4.1.2 OPF</i>	<i>55</i>
<i>3.4.1.3 CPF</i>	<i>55</i>
<i>3.4.1.4 TD</i>	<i>56</i>
3.4.2 FACTS	56
<i>3.4.2.1 SVC</i>	<i>57</i>
<i>3.4.2.2 TCSC</i>	<i>58</i>
4 TESTES E RESULTADOS	60
4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS E SISTEMAS TESTE	60
4.2 TESTES	64
4.3 CASOS BASE	65
4.4 RESULTADOS	72
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	80
5.1 CONCLUSÕES	80

5.2	TRABALHOS FUTUROS	80
	REFERÊNCIAS	82
	ANEXO A	84
	ANEXO B	91
B.1	FLUXO DE POTÊNCIA (PF)	91
B.1.1	Newton Raphson	91
B.2	FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO (OPF)	92
B.2.1	Máximo Benefício Social	92
B.3	FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO (CPF)	93
B.4	ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO (TD)	94
B.4.1	Método Trapezoidal	94
	ANEXO C	97

1 INTRODUÇÃO

Desde o ano 1870 quando a energia elétrica foi inicialmente utilizada comercialmente, a maneira de levar esse produto até o consumidor final passou por muitas mudanças. Os sistemas elétricos de potência tornaram-se maiores com o passar do tempo e, portanto, as complicações que estes apresentavam foram também se incrementando. Mas, além da complexidade de um sistema de potência, ele é sempre julgado avaliando os seguintes pontos:

- O sistema deve ter a capacidade de atingir mudanças instantâneas e contínuas de demanda em potências ativa e reativa.
- O sistema deve suprir a demanda ao menor custo e com o menor impacto ecológico possível.
- A qualidade do sistema deve cumprir padrões referentes aos seguintes fatores: frequência, tensão e confiabilidade.

O termo confiabilidade inclui segurança e adequação do sistema. A adequação pode ser definida como a habilidade do sistema de minimizar, ou manter a níveis aceitáveis, a energia não entregue devido a interrupções, programadas ou não, que não implicam em transitórios prejudiciais ao sistema elétrico. Segurança é a habilidade do sistema em evitar transitórios que levariam a desligamento de grandes áreas, ou a menos se recuperar de tais transitórios após faltas graves (ANDERSON; FOUAD, 2003). Para atingir estes requisitos, muitos níveis de controle têm sido desenvolvidos. Com o crescimento dos sistemas de potência e com o crescimento da demanda da energia elétrica, a confiabilidade na operação e as exigências do planejamento destes sistemas têm que ser maiores. Porém, a capacidade de transmissão dos sistemas em operação deve aproximar-se quanto for possível à capacidade para a qual o sistema foi planejado. Muitos dispositivos têm sido utilizados na evolução dos sistemas de potência, tanto para ajudar na segurança do sistema quanto para elevar a capacidade de transmissão.

Diferentes soluções foram postas em prática para combater os problemas decorrentes do crescimento da demanda, equipamentos tradicionais tais como compensadores de reativos e transformadores desfasadores têm sido utilizados. Com o avanço da eletrônica e a partir da invenção dos tiristores, que permitem o chaveamento eletrônico, os equipamentos tradicionais começaram a incluir a eletrônica de potência. Na década de 1970, uma família de dispositivos foi criada para ajudar a reduzir essa diferença entre a quantidade de energia transmitida

na operação com aquela quantidade projetada no planejamento. Estes novos controladores são chamados dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*). O termo *flexible* (flexibilidade), usado para descrever um sistema de potência e sob o ponto de vista de um projetista, indica que o sistema tem a capacidade de se adaptar rapidamente a contingências e modificações. O acrônimo FACTS, refere-se a sistemas AC que incorporam controladores baseados na eletrônica de potência para elevar a confiabilidade e a capacidade de transferência.

Os FACTS surgiram com 2 objetivos principais: incrementar a capacidade de transferência de um sistema de potência e manter o fluxo de potência sob as linhas designadas. Foram sendo cada vez mais utilizados nos sistemas de transmissão no planejamento de expansão uma vez que ajudam no rendimento do sistema, o que representa um atraso no investimento para construção de nova infraestrutura. Com essas grandes vantagens surge um outro problema, tentar alocar da melhor forma cada FACTS em busca de otimizar o rendimento do dispositivo e, com isso, o rendimento do sistema. Este é então o problema estudado neste trabalho.

A ajuda que os FACTS oferecem no regime permanente é principalmente representada pela potência reativa que os dispositivos injetam no sistema. Isto, permite um grande controle sobre o fluxo nas linhas de transmissão. Além do mais, os FACTS incrementam a habilidade do sistema para se recuperar de um distúrbio e recobrar o estado estável. A habilidade é então caracterizada pela estabilidade dinâmica (oscilatória) e transitória do sistema. O sistema de transmissão é dito transitoriamente estável se ele consegue recuperar a sua operação normal depois de um grande distúrbio e é dito dinamicamente estável se consegue recuperar a sua operação normal depois de uma pequena alteração (SONG; JONHS, 1999).

Os estudos que devem ser desenvolvidos para determinar os tipos, capacidades e localizações ótimas de equipamentos FACTS na rede podem ser classificados como estudos de expansão do sistema. Este problema possui uma formulação matemática complexa, exigindo que o modelo não linear da rede elétrica seja considerado e que estudos sobre o desempenho dinâmico do sistema sejam realizados (FARIAS, 2010).

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na bibliografia que foi revisada para construir uma base do presente estudo, foram encontrados vários tipos de abordagens do problema de alocação de dispositivos FACTS. Existem já muitos artigos que tentam alocar FACTS numa rede de potência, a maioria destes faz a busca da alocação utilizando algum tipo de meta-heurística. A popularidade das meta-heurísticas nas propostas de alocação ótima deve-se à facilidade que este método oferece na busca de soluções

de boa qualidade em problemas difíceis de linearizar. Os artigos estudados abordam diferentes dispositivos e alocam desde os FACTS mais básicos, os quais só incluem compensação passiva, até os FACTS de segunda geração, os quais têm compensação ativa e reativa, construídos a base da eletrônica de potência.

Radu e Besanger (2006) utilizam um AGMO (Algoritmo Genético Multiobjetivo) para alocar SVCs e TCSCs num sistema de distribuição. Faz uma avaliação técnica penalizando os sobrecarregamentos e as variações de tensão, como também uma avaliação econômica variando o custo do dispositivo dependendo da capacidade que precisa ser instalada. Explica com detalhes como foi desenvolvido o AGMO e a atribuição de *fitness* em cada iteração. É interessante neste artigo que ao final se estuda uma contingência no sistema e é descrito o comportamento da rede ante essa falta. Também demonstrou-se, como era esperado, que o incremento no número de dispositivos otimiza a função técnica, mas afasta a econômica do seu mínimo.

Farias (2010) propõe alocar os dispositivos FACTS através de AGMO. Aloca os dois tipos mais básicos de FACTS, o compensador estático de reativos SVC e o compensador série controlado por tiristores, TCSC. Um fato interessante desta tese é que avaliações econômicas e técnicas são feitas na análise do desempenho do dispositivo em cada ponto. A meta-heurística é só a ferramenta que gerencia a análise para encontrar o ponto mais apropriado para a alocação do dispositivo. O fluxo de potência ótimo testa a factibilidade das soluções e prova que elas respeitam os limites operacionais e físicos da rede. Nesta tese Farias (2010) realça as vantagens que os dispositivos FACTS oferecem à estabilidade dinâmica do sistema, mas ele não leva em conta estas vantagens ao avaliar um dispositivo já alocado no sistema. Faz uma abordagem na forma de problema multiobjetivo e então a otimização visa a obtenção da fronteira de eficiência ou Pareto-ótima. Um ponto a destacar neste trabalho é que foi testado no sistema Sul brasileiro de 182 barras.

Em Melo e Lima (2009) duas meta-heurísticas são analisadas *Tabu Search* (TS) e *Simulated Annealing* (SA). O SVC é o dispositivo alocado, e o método é testado no sistema IEEE-14 de 14 barras. Considera-se como ponto ótimo do problema aquela configuração que apresenta as menores perdas ativas. O artigo provou que com as duas meta-heurísticas chegou-se à mesma solução. No lado negativo, não foi considerado nenhum aspecto econômico, portanto, a solução apresentada contém 9 FACTS instalados o que é inviável para um sistema de 14 barras.

Em Volpi e Almeida (2008) apresenta-se a mesma análise do Radu e Besanger (2006) com os mesmos dispositivos considerados. Neste artigo, o AGMO foi testado no sistema do Paraná que tem 291 barras e 404 circuitos (transformadores e linhas de transmissão). Resultados para testes com populações de até 300 indivíduos e supondo um ou dois FACTS instalados são

apresentados. Finalmente pode-se ver que soluções não dominadas são reiterativas o qual indica que estas regiões são as mais problemáticas.

Vivas, Solari e Figueroa (2007) propõem uma solução ao problema de alocação de FACTS utilizando otimização por enxame de partículas. Esta meta-heurística, conhecida como *particle swarm optimization* (PSO) baseada no comportamento dos pássaros, é utilizada nesta abordagem para encontrar a solução do problema multiobjetivo da alocação de FACTS sem ultrapassar os limites operacionais ao menor custo possível. Esta proposta desconsidera aquelas propriedades dos FACTS que ajudam na estabilidade dinâmica do sistema. Testes foram feitos nos sistemas IEEE de 57 e 118 barras, procurando a alocação ótima de dois dispositivos tipo SVC. Nos resultados apresenta-se que os compensadores conseguem tirar todas as violações de tensão existentes no sistema. Ainda que os resultados demonstram um bom funcionamento do algoritmo, o PSO é uma meta-heurística muito do computador e tem uma implementação mais complexa.

Dahej, Esmaili e Goroohi (2012) apresentam o problema de alocação de FACTS e trabalham com SVCs e TCSCs. Faz uma abordagem muito interessante utilizando um híbrido entre um algoritmo genético binário e PSO (HBGAPSO). O artigo então procura a alocação que contribuirá mais à estabilidade de tensão com menor custo operacional do sistema e com o menor custo de instalação do dispositivo. Os testes foram desenvolvidos sobre o sistema modificado de 30 barras da IEEE. Nos resultados se apresenta uma comparação completa entre diferentes cenários: SVC e AG, SVC e PSO, SVC e HBGAPSO, TCSC e AG, TCSC e PSO, TCSC e HBGAPSO, SVC+TCSC e AG, SVC+TCSC e PSO, SVC+TCSC e HBGAPSO, todos com o sistema de potência em operação normal. As menores perdas, capacidade de carga e custo operacional se deram no caso com SVC+TCSC e HBGAPSO, mas logicamente os custos de instalação cresceram. Neste artigo, ainda que o estudo tenha centrado em estabilidade de tensão, os benefícios que os FACTS apresentam em contingências são desconsiderados.

Outro híbrido da meta-heurística PSO é apresentada em Ravi, Rajaram e Edward (2011). O artigo então avalia cada cenário através de um fluxo de potência ótimo (OPF). Utiliza então um método modificado de pontos interiores para resolver o OPF com várias funções objetivo: o benefício social, minimização do combustível, minimização de perdas e desvio de tensão.

Assim como Dahej, Esmaili e Goroohi (2012) e Ravi, Rajaram e Edward (2011), Tabatabaei et al. (2011) também faz uma alteração ao PSO incorporando aspectos importantes do SA para solucionar o problema de alocação ótima de dispositivos FACTS. Utiliza também SVCs e TCSCs para suas análises, e faz as provas no sistema IEEE14. A meta-heurística resultante chamada de APSO-SA tenta aumentar o índice de estabilidade de tensão e o máximo carregamento da rede, minimizando os custos por investimento e as perdas ativas.

Gitizadeh e Kalantar (2009) apresentam também uma abordagem ao problema tentando tornar o sistema mais robusto, minimizando perdas ativas e cuidando os limites de tensão. Implementa um AG para a busca do ponto ótimo. O ponto mais interessante deste artigo é o enfoque econômico que faz sobre o problema. O artigo descreve o tempo de retorno do investimento além das penalidades que o investimento tem sobre a função objetivo ao avaliar um cenário proposto.

Sutha e Kamaraj (2008) fazem uma abordagem diferente ao problema de alocação. Neste artigo são alocados o dispositivo TCSC e o dispositivo UPFC que é modelado como uma combinação entre um TCSC e um SVC. Para decidir qual é a alocação ótima dos FACTS calcula-se um coeficiente de sensibilidade para cada ramo. Este coeficiente depende dos efeitos que cada contingência ou contingências simultâneas têm sobre um ramo. Testes foram feitos no sistema de seis barras e no sistema de 30 barras, ambos do IEEE, embora as contingências sejam obtidas de um histórico de contingências do sistema estudado. Já alocado o dispositivo, então é a meta-heurística PSO que fica encarregada de sintonizá-lo para um ótimo funcionamento. Na função objetivo é penalizado cada sobrecarregamento nos ramos e o custo de instalação do dispositivo. O artigo não especifica como foi obtido o histórico de contingências para cada sistema, nem esclarece como são variados os parâmetros do FACTS.

Durairaj e Fox (2008) focalizam o trabalho na alocação de TCSCs com o objetivo de melhorar o desempenho do sistema no regime permanente. Tenta minimizar as perdas ativas procurando uma alocação ótima através da utilização de um AG. Apresenta uma interessante variação do AG incorporando o “blend crossover (BLX- α)”. Faz os testes nos sistemas IEEE-30 e IEEE-118. Penaliza cada violação nos limites de tensão, energia reativa e energia aparente na função que avalia cada cenário. O artigo não deixa bem esclarecido como se faz a codificação de cada solução, nem diz quanto demora a meta-heurística em convergir para os resultados mostrados.

Taher e Besharat (2008) propõem encontrar uma alocação ótima dos dispositivos FACTS através da gestão de congestionamento da rede de transmissão. A escolha da alocação ótima é feita através da avaliação de um índice de performance. Esta é uma abordagem muito interessante já que identifica as linhas que estão sobrecarregadas. O artigo descreve as vantagens e as deficiências da proposta. Inclui também uma análise econômica ao avaliar uma solução. Finalmente os resultados são os esperados, mas o algoritmo foi testado só em sistemas pequenos.

Uma solução para o problema de alocação ótima de FACTS com *Evolutionary Programming* (EP) é apresentada em Ramasubramanian, Prasana e Sumathi (2012). O enfoque neste artigo é com o objetivo de aliviar o congestionamento nas linhas. Testado no sistema IEEE-14, o algoritmo escolhe a melhor posição do dispositivo. Em cada cenário é avaliado quanto ajuda

o dispositivo no descongestionamento nas linhas. Isto é conseguido alocando o dispositivo na linha com maior “*power loss sensitivity index*”. Os cálculos para os índices são baseados na análise que foi apresentada em (TAHER; BESHARAT, 2008).

Vijayakumar e Kumudinidevi (2007) alocam TCSCs e UPFCs no sistema de 9 barras do IEEE. Propõem usar um algoritmo genético para reduzir o custo global do sistema. A função objetivo inclui os custos de instalação do dispositivo e os custos de geração totais do sistema. Como a unidade do custo de geração é US\$/hr e a unidade do custo do dispositivo é US\$, o artigo supõe que o dispositivo vai ser empregado só três anos para o controle do fluxo de potência. Os resultados neste artigo foram apresentados para três diferentes cenários de carregamento.

A partir da revisão bibliográfica desenvolvida, conclui-se que, ainda que o problema de alocação de FACTS seja um problema amplamente conhecido não existem trabalhos que incluíam estudos dinâmicos e estáticos para alocar os dispositivos dentro da rede.

Tem-se uma boa quantidade de trabalhos recentes abordando o problema de alocação de FACTS. Este problema vem sendo muito trabalhado e é bom notar que os artigos encontrados são de várias universidades em diferentes partes do mundo.

Como foi apontado anteriormente devido à complexidade do problema, a maior parte dos trabalhos implementa uma meta-heurística para encontrar uma solução de boa qualidade mesmo assim que não se garante que essa solução seja o ótimo global do problema. Embora, a meta-heurística pode então determinar o ponto onde o dispositivo vai ser instalado ou pode parametrizar o dispositivo determinando a posição por meio de um indicador. Na literatura vários indicadores foram encontrados para ajudar nesta questão, avaliam o sistema dependendo da abordagem que o autor faz do problema. Por exemplo, Ramasubramanian, Prasana e Sumathi (2012) cria um indicador que avalia quanto ajuda o FACTS a descongestionar o sistema.

A maior parte dos trabalhos revisados aloca FACTS de primeira geração, SVCs e TCSCs. A grande vantagem destes dispositivos reside na simplicidade do seu modelamento matemático. Neste trabalho são também alocados estes dispositivos.

1.2 OBJETIVO E DESCRIÇÃO DO TRABALHO

Da revisão bibliográfica descrita, e vendo a necessidade de complementar a parte do regime permanente com a análise em estado transitório para dar uma alocação mais otimizada do dispositivo, apresenta-se uma nova proposta para alocação ótima de dispositivos FACTS num sistema de energia elétrica. A ferramenta principal a ser utilizada para o desenvolvimento do projeto é o *software* Matlab. O programa foi desenvolvido neste *software*, utilizando alguns

toolboxes para as análises dos sistemas de potência.

A motivação deste trabalho é aproveitar as qualidades dos dispositivos FACTS para a compensação de reativo nas linhas e a habilidade dos mesmos para controlar o fluxo de potência pelas linhas desejadas. Otimizar a alocação destes em função da ajuda que os dispositivos podem oferecer para manter o sincronismo durante uma falta ou um distúrbio no sistema. Conhecendo as vantagens que os FACTS oferecem é o nosso interesse obter o maior benefício deles quando instalados dentro de um sistema de potência.

A missão é criar uma meta-heurística que gerencie a troca de posição do dispositivo no sistema e utilizar o *toolbox* PSAT do Matlab para avaliar o desempenho do dispositivo nessa posição. O aporte mais significativo deste trabalho então é unificar a análise em regime permanente com aquele em estado transitório. A meta-heurística está na capacidade de, com os resultados obtidos do PSAT, descartar ou guardar uma configuração específica da rede. Em cada configuração da rede, o programa faz um teste de convergência e se a configuração converge então a função objetivo é avaliada para conhecer a qualidade desta configuração. A meta-heurística armazena a configuração com melhor função objetivo para assim oferecer no final a posição e a parametrização do dispositivo naquela configuração.

No capítulo 2 deste texto explica-se com detalhes os equipamentos FACTS. São apresentados os dois tipos de FACTS que vão ser estudados nesta pesquisa. Mostram-se as vantagens e desvantagens dos dispositivos e finalmente se detalha o modelamento matemático dos dispositivos.

No capítulo 3 entra-se no problema de alocação de FACTS, focados já unicamente nos SVCs e nos TCSCs. O problema é inicialmente descrito, para depois apresentar o modelo desenvolvido, as considerações levadas em conta e a hipótese do nosso trabalho. Também é explicada a metodologia, especificamente a meta-heurística desenvolvida durante a pesquisa. Finalmente se expõem as ferramentas que foram utilizadas para avaliar as soluções do problema e rodar as rotinas pertinentes no sistema elétrico de potência.

No capítulo 4 são apresentados os testes e os resultados que foram encontrados.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões gerais do trabalho. São apresentadas também as ideias de trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos em futuras pesquisas.

2 OS DISPOSITIVOS FACTS

Neste capítulo são descritos os dispositivos FACTS, dando uma ênfase no SVC e no TCSC que são os dispositivos usados neste trabalho. Para cada um dos dispositivos expõe-se as características gerais, assim como as vantagens e desvantagens que apresentam na rede de transmissão de energia elétrica. Finalmente, os modelos matemáticos dos FACTS que foram utilizados no desenvolvimento da pesquisa vão ser apresentados.

2.1 JUSTIFICATIVA E HISTORIA DOS FACTS

As limitações básicas em um sistema de potência clássico (distância, estabilidade e controlabilidade do fluxo) levaram no final da década de 1970 à introdução de um controle baseado na eletrônica de potência para a compensação de reativo. A necessidade de encontrar soluções para estes problemas e limitações fizeram com que o desenvolvimento tecnológico fosse focado nos FACTS, com o objetivo final de dar um controle em tempo real, baseado na eletrônica de potência, ao sistema de transmissão de potência.

Os FACTS foram lançados para resolver problemas emergentes no sistema devido a restrições na construção de linhas de transmissão e para facilitar o crescimento nos intercâmbios de energia. Os dois principais objetivos dos FACTS foram:

- Aumentar a capacidade de transferência de potência nos sistemas de transmissão e
- Manter o fluxo de potência sobre as rotas pré-definidas.

O primeiro objetivo implica que o fluxo de potência sobre uma determinada linha pode ser incrementado até o limite térmico forçando a corrente necessária através da impedância série da linha se, ao mesmo tempo, a estabilidade do sistema é mantida usando o apropriado controle de potência em tempo real durante e depois de uma falta. Isto não significa que a linha vai trabalhar normalmente no seu limite térmico, mas sim que essa opção está disponível no caso de uma contingência no sistema.

O segundo objetivo implica que, se o controle sobre a corrente em uma linha é possível (por exemplo, variando o valor efetivo da impedância série), o fluxo de potência pode ser levado por um corredor específico de transmissão, evitando assim, fluxos paralelos e fluxos colaterais. Está

implícito neste objetivo que, no caso de uma contingência no caminho primário de potência, deve-se ter a capacidade de mudar rapidamente para um caminho alternativo que deve estar disponível.

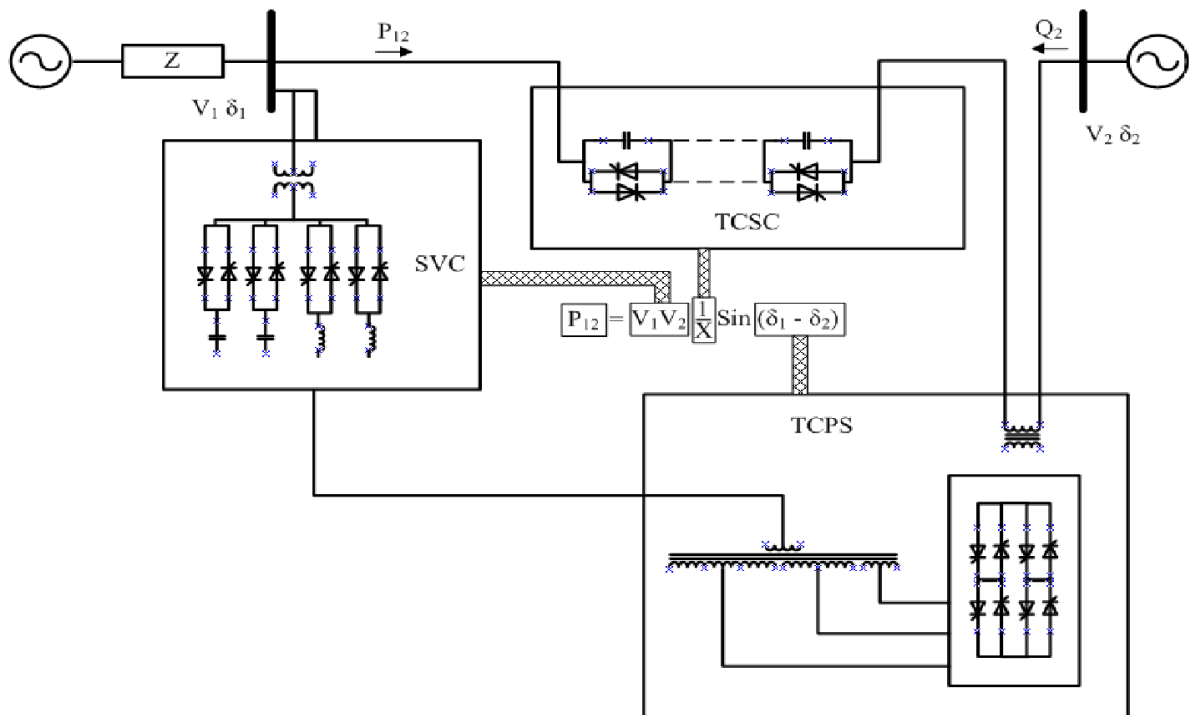
Pode-se ver que só com o sucesso nestes dois objetivos básicos, tem-se um incremento significativo na utilização dos recursos existentes (e novos) na transmissão.

A implementação dos objetivos mencionados requer o desenvolvimento de compensadores e controladores de alta potência. A tecnologia da qual depende esta implementação é a eletrônica de alta potência (centenas de MVAs) com operações de controle em tempo real. Porém, com uma grande quantidade destes controladores e compensadores espalhados pelo sistema, a coordenação e o controle geral para assegurar benefícios máximos e prevenir interações não desejadas entre diferentes configurações e objetivos, tanto em condições normais quanto em contingenciais, apresenta um desafio tecnológico diferente. O desafio é desenvolver estratégias de controle apropriadas para a otimização do sistema, *links* de comunicação e os pertinentes protocolos de segurança. Esta realização do controle da otimização do sistema pode ser considerado como o terceiro objetivo dos FACTS (SONG; JONHS, 1999).

2.2 CONTROLADORES FACTS

A faixa de potência dos controladores FACTS pode ir de poucos MVAs a algumas centenas de MVAs. Para a análise dos controladores FACTS, pode-se dividir o estudo em duas diferentes tecnologias. O primeiro grupo utiliza impedâncias reativas ou transformadores com taps variáveis, chaveados com tiristores, como elementos controlados e o segundo grupo utiliza conversores estáticos auto-comutados como fontes de tensão controladas. Sendo os SVCs e os TCSCs impedâncias reativas controladas com tiristores, só o primeiro grupo é de interesse para o nosso trabalho.

Além do SVC e do TCSC, entra no primeiro grupo o transformador defasador controlado a tiristor (TCPS). Todos estes equipamentos utilizam tiristores convencionais (são aqueles que não têm impedância intrínseca) em arranjo de circuitos. Os tiristores atuam similar a um disjuntor só que possuem uma velocidade de resposta maior e são operados por sistemas de controle sofisticados. Cada um destes dispositivos pode atuar sobre um dos três parâmetros que determinam a transmissão de potência, a tensão (SVC), o ângulo de transmissão (TCPS) e na impedância da linha (TCSC), como se mostra na Figura 1.

Figura 1 - Dispositivos FACTS convencionais controlados a tiristor.

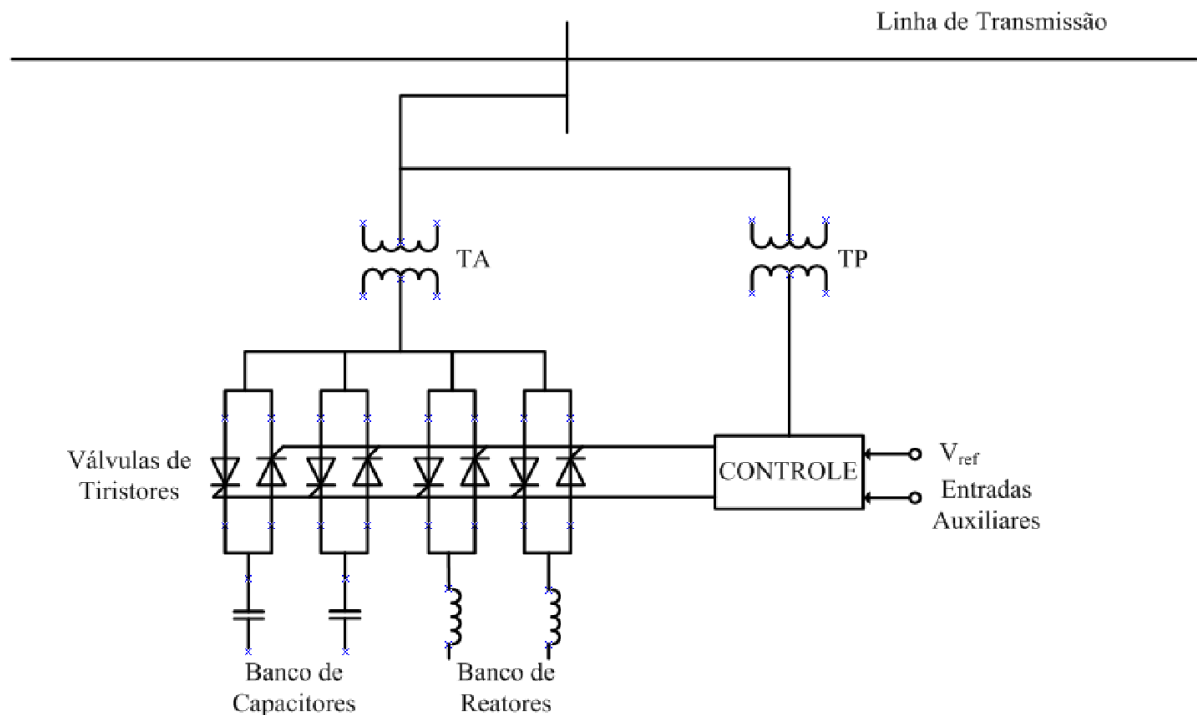
Fonte: Song e Jonhs (1999).

O SVC e o TCSC têm a característica que a potência reativa necessária para a compensação do sistema é gerada ou absorvida por um banco de capacitores ou retores, e as chaves de tiristores são utilizadas somente para o controle da combinação da impedância reativa que os bancos apresentam no sistema de corrente alternada (SONG; JONHS, 1999).

2.2.1 O compensador estático de reativos (SVC)

O SVC (“*static var compensator*”) é um compensador de reativo controlado a tiristores. O SVC pode ser considerado o precursor dos controladores FACTS. Foi desenvolvido em 1970 e logo adaptado para aplicações no sistema de transmissão. Um SVC, tipicamente conectado em derivação, é constituído por capacitores chaveados a tiristor e retores controlados a tiristor. A quantidade de potência reativa entregue pelo dispositivo pode variar continuamente entre as faixas indutivas e capacitivas do equipamento. A Figura 2 mostra um SVC com bancos de capacitores chaveados a tiristor e bancos de retores controlados a tiristor (JANKE et al., 2010).

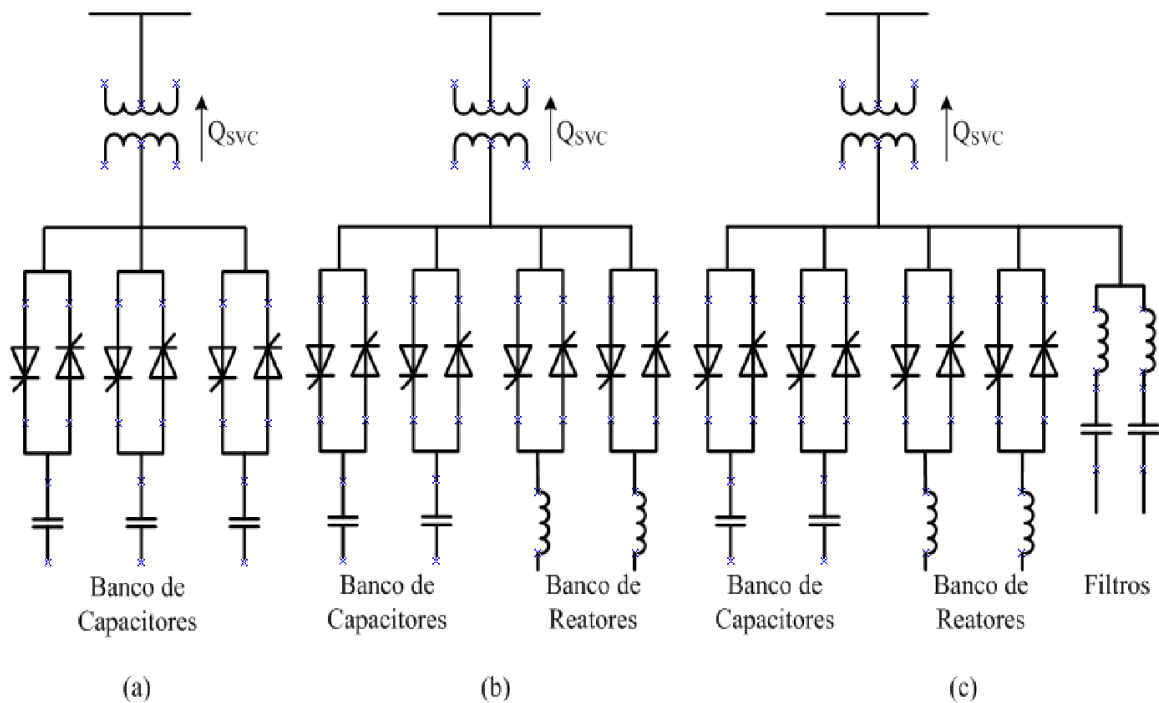
Figura 2 - SVC com bancos de capacitores chaveados a tiristor e bancos de reatores controlados a tiristor.



Fonte: Song e Jonhs (1999).

Também existem SVCs controlados discretamente e que somente tem os bancos de capacitores chaveados a tiristor. Outra configuração conhecida dos SVCs é baseada não somente nos bancos de capacitores chaveados a tiristor e os bancos de reatores controlados a tiristor, mas também constam de bancos de filtros. Esta ultima configuração é mais utilizada com propósitos industriais e para compensação *flicker*. Na Figura 3 são mostradas diferentes configurações do SVC, (JANKE et al., 2010).

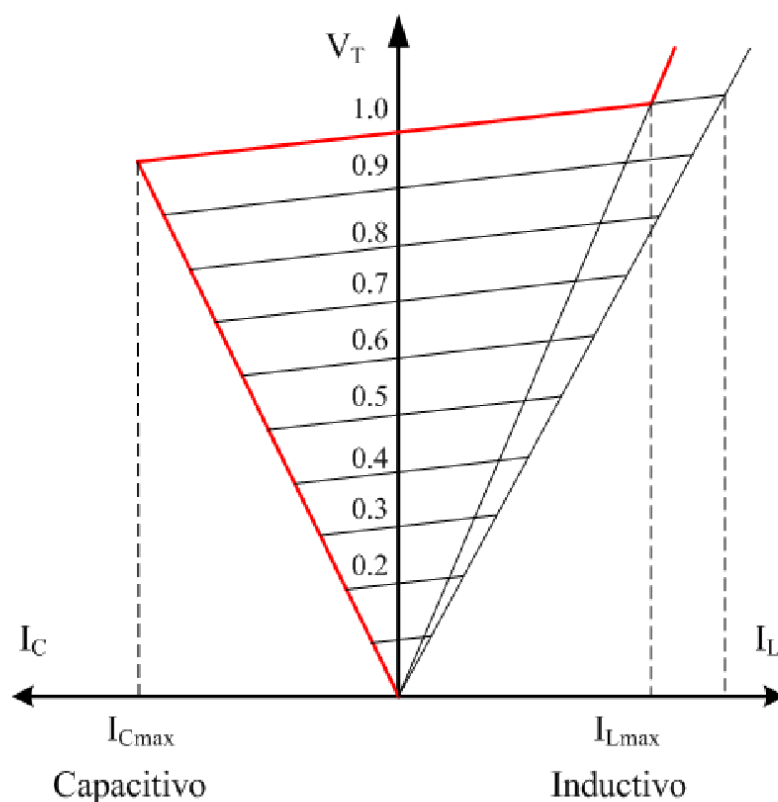
Figura 3 - (a) SVC somente com bancos de capacitores chaveados a tiristor, (b) SVC com bancos de capacitores chaveados a tiristor e bancos de reatores controlados a tiristor e (c) SVC com bancos de capacitores, bancos de reatores e filtros.



Fonte: Janke et al. (2010).

O compensador SVC é normalmente instalado em derivação e é operado para regular a tensão em uma barra no sistema de transmissão. O objetivo do controle é manter a tensão da barra no valor desejado. Se a tensão na barra começa a cair o SVC vai injetar mais potência reativa no sistema, assim, incrementando a tensão da barra de novo. Ao contrário, se a tensão na barra aumentar, o SVC vai diminuir a potência reativa injetada (ou vai consumir reativo) e como resultado a tensão vai diminuir voltando ao valor desejado. Essa injeção ou consumo de reativo é feita sempre dentro dos valores controlados.

A resposta do SVC em regime permanente vai seguir a curva característica V-I mostrada na Figura 4. A curva indica que a regulação com uma determinada declividade ao redor da tensão nominal pode ser obtida na faixa normal de operação definida pelas correntes indutivas e capacitivas máximas do SVC (SONG; JONHS, 1999).

Figura 4 - Curva característica V-I do SVC.

Fonte: Song e Jonhs (1999).

Além do controle da tensão, os SVCs são também empregados para melhorar a estabilidade tanto em pequenas quanto em grandes perturbações. A efetividade do SVC no amortecimento de oscilações de potência está diretamente relacionada com a capacidade de variação de tensão que pode produzir (SONG; JONHS, 1999).

Os SVC são bastante utilizados nos sistemas elétricos de potência sendo que há mais de 750 dispositivos instalados no mundo inteiro. O compensador estático de reativos já vem sendo utilizado com sucesso há várias décadas, enquanto o TCSC está sendo implementado nos sistemas já existentes com certa cautela (PASCHOARELI, 2007).

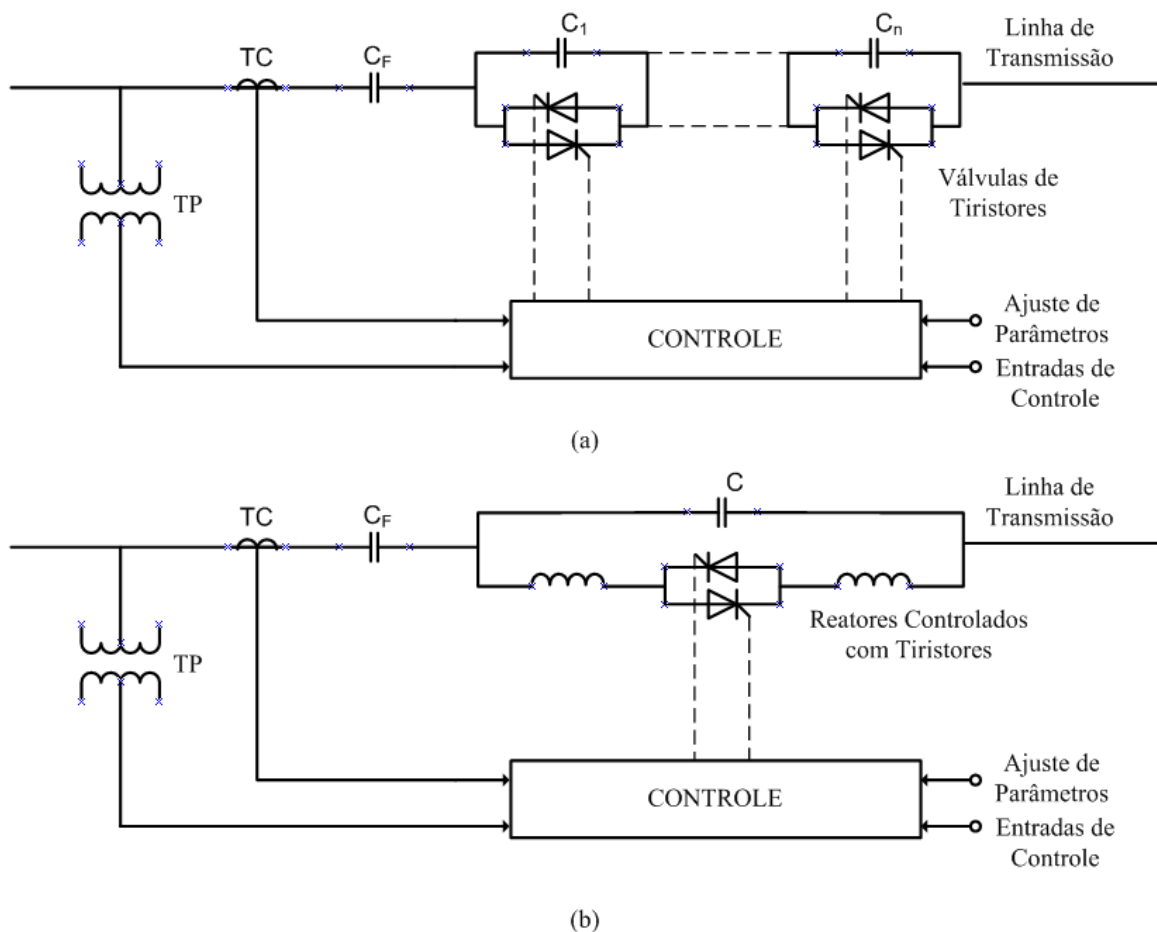
2.2.2 O compensador série controlado a tiristor (TCSC)

O TCSC (“*Thyristor Controlled Series Compensator*”) oferece uma grande quantidade de benefícios ao sistema elétrico de potência. O TCSC tem a capacidade de alterar rápida ou suavemente a impedância da linha de transmissão na qual se encontra. Atingindo o segundo

objetivo dos controladores FACTS, se os parâmetros do TCSC são apropriadamente ajustados, o fluxo de potência poder ser mantido sobre as rotas pré-definidas de acordo com (HUANG; LI, 2002).

Na Figura 5 são mostrados dois diferentes esquemas do controlador TCSC. O primeiro usa capacitores chaveados a tiristor e a impedância da linha é controlada com o dispositivo de forma discreta. O segundo tem o capacitor em paralelo com reatores controlados a tiristor, de modo que o valor da impedância série pode variar continuamente de acordo com as faixas do dispositivo.

Figura 5 - (a) TCSC utilizando capacitores chaveados a tiristor e (b) TCSC utilizando um capacitor em paralelo com reatores controlados a tiristor.



Fonte: Song e Jonhs (1999).

No primeiro caso o controle da compensação série é de forma discreta e é realizada incrementando ou diminuindo a quantidade de bancos conectados. No caso do capacitor fixo em paralelo com o reator controlado a tiristor, o controle é contínuo e é realizado variando o pe-

ríodo de condução dos tiristores e, portanto, a corrente no reator. Estes esquemas podem ser combinados para assim lograr um melhor controle e uma maior flexibilidade.

Os primeiros três TCSCs foram instalados nos Estados Unidos no começo da década de 1990. Hoje já existem outros equipamentos TCSCs instalados no mundo (PASCHOARELI, 2007).

2.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS

Segundo Paschoareli (2007) além dos objetivos iniciais pelos quais os FACTS foram desenvolvidos, a utilização de controladores FACTS proporciona:

- Aumento da capacidade de transferência de potência nos sistemas de transmissão.
- Controle do fluxo de potência sobre as rotas pré-definidas.
- Prevenção de blecautes através da limitação de corrente e desligamento das linhas críticas.
- Melhoria na produtividade na geração de energia através de uma proporcionalização da carga entre os geradores.
- Controle de expansão e redimensionamento do sistema.
- Redução do fluxo de potência reativa pelo sistema bem como de *loopings* de fluxo.
- Auxílio à manutenção da estabilidade através do amortecimento de oscilações transitórias e/ou subtransitórias.

Dentre as desvantagens e limitações dos FACTS, Ilic, Xie e Liu (2013) enumeram:

- Os dispositivos FACTS não possuem nenhum elemento resistivo ou dissipador. Por consequência, sua efetiva resposta a distúrbios somente pode ser uma solução temporária.
- Outra limitação é a quantidade de energia que o equipamento consegue armazenar. Esta limitação incide diretamente com o intervalo de tempo no qual o controle é efetivo. Quanto mais energia o equipamento pode armazenar, maior é o tempo que ele vai preservar a estabilidade do sistema.

Independentemente de cada um dos dispositivos, pode-se dizer que o SVC oferece controle de tensão, compensação de reativos e amortecimento de oscilações. Enquanto o TCSC nos dá,

controle de potência, controle de tensão, controle de impedância série e quando equipado com *power oscillation damping* oferece amortecimento de oscilações e melhora na estabilidade transitória. Hingorani e Gyugyi (2000) expõem de forma detalhada as vantagens da compensação em derivação e as vantagens da compensação série.

2.4 MODELAMENTO MATEMÁTICO

Dois tipos de modelamento matemático serão abordados no desenvolvimento desta pesquisa: o primeiro modela os FACTS, especificamente os SVCs e TCSCs, quando se avalia o sistema em regime permanente. O segundo modelamento se dá quando o sistema é estudado em estado transitório. Nesta seção apresenta-se o modelamento referente ao primeiro caso, o segundo caso será abordado no apêndice, baseando-se no modelamento matemático utilizado pelo PSAT.

2.4.1 SVC

O SVC é instalado em uma barra geralmente com o objetivo de controlar a tensão. O SVC pode gerar ou consumir reativo agindo como uma carga capacitiva ou indutiva respectivamente.

Dahej, Esmaeili e Goroohi (2012) considera o SVC como um compensador síncrono modelado como uma barra PV, com limites de Q. Na dissertação em pauta modela-se o SVC no regime permanente como uma carga em derivação, colocam-se limites no valor da susceptância b_{svc} e calcula-se a potência reativa entregue pelo dispositivo como (1).

$$Q_{svc} = -b_{svc} \cdot V^2 \quad (1)$$

Na Tabela 1 apresentam-se os limites de b_{svc} . Esses limites podem, dentro do algoritmo desenvolvido, ser facilmente modificados pelo usuário do programa.

Tabela 1 - Faixa dos parâmetros dos dispositivos utilizados.

	Min	Max
TCSC (α)	-0.5	0.5
SVC (b_{svc})	-0.5 p.u.	0.5 p.u.

Fonte: o próprio autor.

2.4.2 TCSC

O controle do fluxo de potência nas linhas de transmissão com o TCSC é alcançado graças ao controle no incremento ou redução da impedância efetiva total da linha. No regime permanente, o TCSC pode ser considerado como uma impedância série, portanto para controlar a impedância total da linha basta fixar o valor da impedância do equipamento. Deixando a impedância do TCSC parametrizada, então a impedância total da linha que vai da barra 'i' para a barra 'j' seria dada pela equação 2.

$$X_{ij} = X_{Linha} - X_{tcsc} \quad (2)$$

Onde a X_{tcsc} pode ser alterada com a variação de um parâmetro de compensação (α) multiplicado com o valor da impedância real da linha (X_{Linha}). O valor de X_{tcsc} é mostrado então na equação 3.

$$X_{tcsc} = \alpha * X_{Linha} \quad (3)$$

Os limites da impedância X_{tcsc} , controlada pelo parâmetro α , são apontados na Tabela 1.

3 O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE SVCS E TCSCS

Neste capítulo descreve-se o problema de alocação ótima de equipamentos FACTS. É apresentado o modelo que foi desenvolvido com o fim de alocar da melhor forma os dispositivos dentro da rede elétrica de potência. Este capítulo expõe as considerações levadas em conta para solucionar o problema. Também se explica a hipótese na qual foi baseada a pesquisa e os resultados esperados. Além disso, aqui será explicada a metodologia utilizada e as ferramentas que são usadas para avaliar cada possível solução.

3.1 ALOCAÇÃO ÓTIMA DE DISPOSITIVOS FACTS

Como mencionado, os dispositivos FACTS apresentam benefícios para a rede elétrica de potência tanto no regime permanente como no estado transitório. Alocar os equipamentos com o objetivo de obter o maior benefício possível, torna-se então, um problema de planejamento muito importante. No Capítulo 2 foram listados todos os benefícios que os dispositivos FACTS apresentam à rede elétrica, e foram descritos com detalhe os dispositivos que são de interesse para a nossa pesquisa.

Nesta pesquisa foram alocados SVCs e TCSCs. Se analisarmos um sistema de potência de grande porte, a quantidade de opções possíveis para alocar os dispositivos converte o problema em um problema combinatório muito grande. Com o objetivo de reduzir o espaço de busca e tornar possível encontrar um ótimo local de qualidade de forma mais rápida, foi desenvolvida uma meta-heurística.

A meta-heurística é então a responsável por decidir pela instalação ou não de um equipamento em uma determinada barra ou circuito, dirigindo cada passo durante a busca do melhor cenário na alocação dos dispositivos. Diferentes considerações foram levadas em conta na hora de alocar FACTS dentro da rede.

3.2 MODELO, CONSIDERAÇÕES E HIPÓTESE

Nesta seção vão ser brevemente explicadas as considerações que foram levadas em conta ao de instalar um dispositivo em um determinado local. Também, é descrito o modelo que foi utilizado para avaliar cada proposta de solução. Apresenta-se o diagrama de fluxo detalhando

cada passo realizado durante a busca. Finalmente, estabelece-se uma hipótese, explicando o que se espera obter do programa desenvolvido.

3.2.1 Modelo

Para buscar a alocação ótima de um ou de vários dispositivos dentro da rede elétrica de potência é necessário quantificar os benefícios que se apresentam quando instalados na rede. Além dessa quantificação, é importante definir quais características devem prevalecer e quais serão mais determinantes ao escolher a posição.

O objetivo do nosso trabalho é alocar quantos equipamentos FACTS for possível em uma sistema de transmissão elétrica. Busca-se reduzir o máximo possível o custo de geração total do sistema e diminuir ao mesmo tempo as perdas totais no sistema. A quantidade de dispositivos que se instalariam seria ilimitada, mas justificando o investimento com uma redução igual ou maior no custo total de geração e nas perdas.

Além da melhoria que um dispositivo apresenta no custo de geração e nas perdas totais do sistema, também melhora a estabilidade e a margem de segurança. Então, a solução apresentada tem que justificar o investimento com a redução de custos mencionados e, simultaneamente, a proposta de solução deve permitir que o sistema opere dentro de requisitos especificados do índice de máximo carregamento e de estabilidade transitória. Se estas últimas condições não forem cumpridas por uma determinada solução, essa solução sairá do espaço de soluções factíveis do problema.

SVCs e TCSCs poderão ser instalados para minimizar a função objetivo. O investimento feito para a aquisição e instalação destes equipamentos será considerado como um valor fixo e a compensação máxima dos dispositivos será igual em todos os casos.

A equação (4) apresenta o modelo que foi utilizado nesta pesquisa, sujeito às restrições mostradas:

$$\min z = w_1 \cdot CG_i + w_2 [C_{svc} \cdot N_{svc} + C_{tcsc} \cdot N_{tcsc}] + w_3 \cdot Per_i$$

s.a.

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_i &\leq \overline{\Delta\lambda} & (4) \\ If_i &\leq \overline{If} \\ N_{svc} &\geq 0 & \rightarrow \text{inteiro} \\ N_{tcsc} &\geq 0 & \rightarrow \text{inteiro} \\ g(\delta, V, Q_G, P_S, P_D) &= 0 & \rightarrow \text{Equações do Fluxo de Potência} \end{aligned}$$

Sendo:

z : a função objetivo do nosso problema de minimização.

(w_1, w_2, w_3) : os pesos que cada elemento tem dentro da função objetivo.

CG_i : custo total de geração na solução i .

C_{svc} : custo de um dispositivo SVC instalado.

C_{tcsc} : custo de um dispositivo TCSC instalado.

N_{svc} : número de SVCs instalados.

N_{tcsc} : número de TCSCs instalados.

Per_i : custo das perdas totais no sistema na solução i .

λ : índice de máximo carregamento.

$\Delta\lambda_i$: crescimento de λ na solução i .

$\overline{\Delta\lambda}$: requerimento de crescimento mínimo de λ .

If_i : Índice de faltas atingidas na solução i .

\overline{If} : Índice mínimo de faltas atingidas.

A função objetivo apresentada será penalizada no caso que uma das duas primeiras restrições do modelo não for atingida. (5) apresenta a nova função objetivo do modelo. A metaheurística terá que calcular então a função objetivo para cada proposta de solução. Uma função objetivo penalizada terá um valor muito grande e pouco atrativo. Em consequência a metaheurística vai desconsiderar essa proposta de solução.

$$\begin{aligned} \min z = & w_1 \cdot CG_i + w_2 [C_{svc} \cdot N_{svc} + C_{tcsc} \cdot N_{tcsc}] + w_3 \cdot Per_i + \\ & + p_1 \begin{pmatrix} 0 & \text{se } \Delta\lambda_i \leq \bar{\Delta\lambda} \\ 1 & \text{se } \Delta\lambda_i > \bar{\Delta\lambda} \end{pmatrix} + p_2 \begin{pmatrix} 0 & \text{se } If_i \leq \bar{If} \\ 1 & \text{se } If_i > \bar{If} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

Sendo:

(p_1, p_2) : valores das penalizações na função objetivo.

É importante apontar que o valor dos pesos e as penalidades são fixados pelo planejador e, desses valores definidos, vai depender o resultado final obtido. As análises necessárias para o cálculo de CG_i , Per_i , $\Delta\lambda$ e If_i serão detalhadas mais na frente neste capítulo. Nos testes que serão apresentados logo neste trabalho, os valores dos pesos w foram fixados em 1. Mesmo que todos os itens da função objetivo da equação (4) são quantificados em valor monetário, incluem-se dentro do modelo os pesos w para aplicações específicas, caso o usuário precise.

3.2.2 Codificação

De forma sucinta enumeram-se a seguir as considerações que leva em conta o modelo descrito:

- SVCs e TCSCs são os dois tipos de FACTS que podem ser instalados no sistema. Ambos contemplam unicamente compensação tradicional controlada ou chaveada por tiristores convencionais. O modelo não contempla compensação de energia ativa.
- A quantidade de dispositivos vai ser restringida e/ou dependerá única e exclusivamente do benefício econômico que apresente ao sistema.
- Além do benefício econômico, ou seja, a redução de custos, a proposta de solução ou indivíduo deverá melhorar quanto for especificado o índice de máximo carregamento e a estabilidade transitória do sistema.

A meta-heurística será responsável pela escolha de indivíduos a serem avaliadas. Uma solução deve ser construída como uma matriz ($N \times 4$) assim como mostrada na Tabela 2, em que N é o número de dispositivos no indivíduo.

3.2.3 Hipótese

O problema de alocação de equipamentos SVCs e TCSCs em um sistema elétrico de potência, com as considerações anteriormente explicadas, dependendo do tamanho do sistema

Tabela 2 - Formato de um individuo dentro do espaço de busca.

Coluna	Caso	
#	SVC	TCSC
1	1	2
2	# barra	0
3	0	# circuito
4	X	X

Fonte: o próprio autor.

estudado, pode ter um espaço de soluções de 2^{nb+nl} , sendo nb o número de barras do sistema e nl o número de linhas. Isto, mais o fato de que para avaliar o desempenho de cada indivíduo devem-se executar diferentes rotinas, faz imprescindível um método de otimização na busca de soluções de boa qualidade. Uma meta-heurística foi desenvolvida com este propósito.

Depois de executar um algoritmo que restringe o espaço de busca de forma eficiente espera-se:

- Achar uma solução que diminua os custos de geração do sistema.
- Robustecer o sistema com o incremento do índice de máximo carregamento.
- Evitar a perda de estabilidade do sistema para faltas nas quais o sistema foi provado instável.
- Achar uma solução de forma rápida, que cumprindo com os pontos já estipulados, justifique o investimento nos equipamentos propostos.

No capítulo 4 deste documento serão verificadas as previsões aqui descritas.

3.3 METODOLOGIA (META-HEURÍSTICA)

3.3.1 Embasamento Teórico

Na seguinte seção será definida de forma básica o conceito de heurística e meta-heurística. Também explica-se de forma resumida as diferentes meta-heurísticas e justifica-se a escolha feita para o desenvolvimento do trabalho.

3.3.1.1 *Heurísticas*

Na sua definição básica, uma heurística é um algoritmo que encontra, com baixo esforço computacional, uma solução de boa qualidade para um determinado problema. As heurísticas garantem que a solução obtida seja somente de boa qualidade, mas não assim, se garante que essa solução seja o ótimo global do problema. Mesmo que a solução não seja a ótima global do problema, o baixo esforço computacional e a facilidade na implementação fazem das heurísticas uma opção atraente quando é preciso resolver problemas com um grande espaço combinatório ou com numerosas soluções. Segundo Romero e Mantovani (2004), as heurísticas são técnicas de otimização que através de passos muito bem definidos encontram uma solução de boa qualidade para um problema complexo.

Um algoritmo heurístico começa em um determinado ponto do espaço de busca e realiza uma série de transições até chegar em um ótimo local do problema. O algoritmo mais popular é o algoritmo heurístico construtivo onde a cada passo é escolhida uma componente da solução e o processo termina quando é encontrada uma solução factível para o problema (ROMERO; MANTOVANI, 2004)

3.3.1.2 *Meta-heurísticas*

A meta-heurística é considerada como a evolução dos algoritmos heurísticos. As meta-heurísticas representam um conjunto de técnicas de otimização que estão adaptadas para lidar com problemas complexos que geralmente apresentam a característica de explosão combinatória.

Considerando um problema com um conjunto de soluções absurdamente grande, a ideia fundamental da meta-heurística é visitar apenas um conjunto reduzido dentro do espaço de busca. Uma meta-heurística é uma estratégia que especifica a forma em que deve ser realizada uma busca inteligente de uma solução quase ótima global. Assim, a diferença entre as meta-heurísticas é a estratégia usada por cada uma delas (ROMERO; MANTOVANI, 2004).

Com o fim de executar o processo de busca, toda meta-heurística deve especificar:

- Como vai ser representada uma solução do problema ou um elemento do espaço de busca.
- A forma de avaliar a função objetivo.
- A vizinhança para uma solução ou elemento.
- Como vai ser feita a transição de uma proposta de solução para outra.

- Se no processo de busca as soluções infactíveis podem ser inclusas ou não, com o objetivo de atingir a solução factível mais próxima possível da solução global.

A estratégia que cada meta-heurística utiliza na busca da solução é o que marca a diferença de uma para outra. Assim, qualquer pesquisador pode desenvolver uma meta-heurística desde que formule uma estratégia eficiente e consistente. Aqui revisa-se as meta-heurísticas mais estudadas na literatura, dando uma explicação breve dos procedimentos que fornecem as soluções de problemas (ROMERO; MANTOVANI, 2004)

3.3.1.3 Principais Meta-heurísticas

Nesta seção explica-se de forma superficial as principais meta-heurísticas que vêm sendo utilizadas pelos pesquisadores nos últimos anos. De Romero e Mantovani (2004) resumem-se as características e as informações mais relevantes em cada uma das técnicas estudadas. Finalmente aprofunda-se mais na meta-heurística GRASP devido a que foi nesta meta-heurística que a pesquisa foi baseada.

Simulated Annealing (SA)

É uma das técnicas mais importantes na resolução de problemas de origem combinatória. Usada pelos físicos na obtenção de cristais perfeitos. Nessa técnica o cristal é aquecido até uma temperatura elevada e depois é esfriado lentamente mantendo durante o processo o chamado quase equilíbrio térmico. Esta técnica idealizada por Metropolis no início da década dos anos 50. Na década de 80 do século XX foi que os pesquisadores Kirkpatrick, Gelatt, Vechi e Cerny encontraram semelhanças no processo físico de *annealing* e no processo de otimização de um problema de pesquisa operacional.

O algoritmo de SA pode ser considerado como um processo de transições em um espaço de busca de um problema complexo. As características fundamentais que apresenta o algoritmo são:

- A forma de escolha do vizinho mais interessante.
- O controle do processo de transições.

Dita escolha do vizinho está baseada no processo de *annealing*. Assim, escolhe-se aleatoriamente um vizinho da topologia corrente e em caso contrário esse vizinho pode ser escolhido de forma probabilística baseado no processo de *annealing*. A escolha de um vizinho de pior qualidade de forma probabilística está controlada por dois parâmetros:

- A temperatura.
- A variação da função objetivo.

Mas, se a variação da função objetivo é pequena e/ou a temperatura for elevada a probabilidade de escolher um vizinho de pior qualidade é elevada. Nas fases iniciais são realizadas muitas transições para vizinhos de pior qualidade e essa probabilidade vai diminuir chegando praticamente a ser nula nas fases finais. Esta lógica permite ao SA sair dos ótimos locais.

SA parte de uma configuração inicial e depois gera um conjunto de configurações candidatas controladas pelo programa de esfriamento que é a estratégia geral do processo, até atingir a convergência. Está caracterizado pela escolha ou determinação do valor inicial de temperatura, número de tentativas de transição a cada nível de temperatura, taxa de diminuição de temperatura e a temperatura ou critério de parada.

A escolha adequada dos parâmetros anteriormente mencionados dirige a eficiência de um algoritmo SA.

Algoritmo Genético (AG)

Meta-heurística formulada usando os mecanismos da evolução e da genética natural, inventado na década de 70 por Holland.

A evolução das espécies é determinada por um processo de seleção que leva aos indivíduos geneticamente melhor adaptados à sobrevivência. O conceito de geneticamente melhor adaptado tem um valor relativo porque depende do fator problemático no meio ambiente.

A população geneticamente melhor qualificada tem a maior possibilidade de chegar à fase adulta e assim poder gerar descendentes transmitindo suas características genéticas na nova população.

Como ideia fundamental o algoritmo genético usa uma população de indivíduos, que nos problemas combinatórios constituem um conjunto de configurações. Nessas configurações tem-se que representar adequadamente uma solução do problema. A representação mais popular é aquela de codificação binária onde, facilmente, são simulados os operadores genéticos de recombinação e mutação. Também, encontra-se uma forma adequada para avaliar a função objetivo (as melhores configurações são aquelas que apresentam função objetivo de melhor qualidade). No AG deve-se encontrar uma estratégia de seleção das configurações com direito a participar nas novas configurações da nova população, deve existir um mecanismo que permita implementar o operador genético de recombinação, um mecanismo para implementar a mutação e, além disso, especificar o tamanho da população ou seja o número de configurações em cada

geração.

Operações básicas de um algoritmo genético:

- Gerar a população inicial após escolher o tipo de codificação.
- Calcular a função objetivo de cada configuração da população, armazenar e atualizar a incumbente.
- Programar a seleção.
- Programar a recombinação.
- Programar a mutação e terminar de gerar a população de nova de geração.
- Se o critério de parada não foi satisfeito, voltar ao passo 2.

Deve-se observar que o algoritmo genético se inspira apenas de forma grosseira a evolução e a genética natural. Nesse contexto apareceu a proposta dos algoritmos evolutivos. A diferença fundamental encontra-se em que o AG modifica o problema original para que seja enquadrado na sua lógica (realiza a codificação binária de representação, faz o mapeamento do espaço de soluções originais e da representação binária, codifica e decodifica as soluções). Na outra mão, um programa evolutivo mantém a estrutura de um problema e modifica o algoritmo genético para que seja enquadrado na estrutura do problema.

Busca Tabu ou Tabu Search (TS)

Desenvolvida nos conceitos de inteligência artificial e, diferente de outros métodos, não teve seu origem nos processos de otimização biológicos ou físicos. Proposta por Fred Glover na década dos anos 80, vem sendo bem utilizada na resolução de problemas nos diversos campos de pesquisa operacional.

Na década dos anos 90, as aplicações na otimização de problemas complexos das diferentes áreas de conhecimento começaram aparecer em forma mais intensa. Basicamente a busca tabu consiste em um conjunto de princípios que de forma integrada permitem resolver um problema complexo da maneira inteligente, considerada assim, devido a que o processo incorpora a memória adaptativa e exploração sensível.

A busca tabu resolve um problema iniciando o processo como qualquer algoritmo heurístico de busca local. Nessa busca local, dada uma configuração, define-se uma vizinhança como sendo o conjunto de todas as configurações que podem ser obtidas pela aplicação de um mecanismo de transição. No algoritmo de busca local, a partir da configuração corrente, passa-se

para a configuração vizinha que apresenta a maior melhoria na função objetivo. Um procedimento repetitivo desta estratégia leva o algoritmo de busca local a parar no momento em que não existe nenhuma configuração vizinha que produz uma diminuição da função objetivo.

O algoritmo mais elementar é chamado algoritmo TS com memória de curto prazo. Este algoritmo usa uma lista de atributos proibidos e um critério de aspiração. A lista tabu que armazena atributos reduz consideravelmente os requerimentos de memória, mas, também acrescenta um problema. O atributo proibido que corresponda a uma configuração já visitada pode ser compartilhado por outras configurações vizinhas candidatas, algumas das quais podem ser altamente atrativas, mas, não poderiam ser visitadas porque possuem um atributo proibido.

Este problema é abordado usando uma função chamada critério de aspiração, assim, pode-se eliminar a proibição de uma configuração candidata.

Em síntese, em um algoritmo de busca tabu básico, deve-se especificar a forma de codificação de uma configuração, a forma de encontrar a função objetivo, a definição da vizinhança e a forma de programar a transição. Muitos algoritmos usados em aplicações práticas são algoritmos TS com memória de curto prazo.

Colônia de Formigas

Baseada no comportamento das formigas, foi proposta primeiramente como uma técnica multiagentes para resolver problemas de otimização combinatória. Uma grande quantidade de estudos foi desenvolvida para estender e aplicar algoritmos baseados no comportamento das formigas para diferentes problemas de otimização discreta.

Foram inspirados na observação de colônias de formigas reais que vivem em colônias e cujo comportamento é direcionado muito mais pela sobrevivência da colônia do que de cada indivíduo.

A filosofia da heurística está baseada no fato de que se, em um dado ponto, uma formiga tem que escolher entre diferentes caminhos, aqueles mais intensivamente escolhidos pelas formigas precedentes (ou seja aqueles com grande intensidade de cheiro) serão escolhidos com alta probabilidade.

3.3.2 GRASP

Dá-se uma introdução à meta-heurística GRASP baseados em Romero e Lavorato (2012), que apresenta os pontos mais importantes de esta técnica de otimização. A meta-heurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) é uma das meta-heurísticas que fo-

ram desenvolvidas usando apenas conceitos do campo da pesquisa operacional. Os criadores Feo e Resende, os inventores do algoritmo GRASP, tinham pleno conhecimento da teoria e da aplicação das técnicas exatas de otimização.

O GRASP é uma adjeção do algoritmo heurístico construtivo do tipo guloso e da heurística SDH (*Steepest Descent Heuristic*). Para um problema genérico, o algoritmo GRASP possui a seguinte forma:

1. Passo preliminar.
2. Fase de pré-processamento.
3. Fase de busca construtiva.
4. Fase de pós-processamento; Busca local.
5. Se o critério de parada foi atingido, pare, e a resposta é a incumbente armazenada. Se não, volte ao passo 3.

No passo preliminar, montam-se os dados do problema. Logo, escolhe-se uma forma de codificação de uma proposta de solução. Depois, identifica-se a forma de avaliar a qualidade da função objetivo ou equivalente. Em seguida, escolhe-se uma estratégia heurística construtiva e uma estratégia de busca local. A heurística construtiva geralmente é um algoritmo heurístico tipo guloso. É comum, para a estratégia de busca local, a escolha de uma heurística tipo SDH.

O pré-processamento identifica atributos ou conjunto de atributos, que permitem iniciar o processo de busca construtiva de forma mais eficiente para diminuir o conjunto de soluções do problema. Colocar restrições ao problema original é uma técnica utilizada para reduzir o tamanho da região factível do problema.

Na fase construtiva o objetivo é tentar gerar uma solução de boa qualidade. Utiliza-se um AHC (Algoritmo Heurístico Construtivo) do tipo guloso. Quando o algoritmo é processado repetidas vezes, esta fase permite gerar um número elevado de soluções de qualidade e geralmente diferentes.

A fase construtiva é a essência do algoritmo GRASP. Nela:

- Tenta-se contornar as limitações de um AHC.
- A lógica fundamental nesta fase consiste em escolher a próxima componente da solução em construção dentre uma lista reduzida de candidatos, lista RCL (*Restricted Candidate List*).

- O número de elementos da lista RCL deve ser variável e deve levar em conta a qualidade dos componentes candidatos à adição.
- A lista pode ter desde um até muitos elementos.
- O número de elementos depende da qualidade das componentes candidatas a serem incorporadas na solução em construção.

A fase construtiva do algoritmo GRASP segue geralmente esta ordem:

1. Escolher a solução inicial, que pode ser vazia e que depois se transforma na solução em construção.
2. Para a solução em construção (com alguns elementos adicionados) e usando um indicador de sensibilidade, elaborar uma lista RCL com os componentes mais atraentes. O número de componentes, k , é determinado de forma adaptativa.
3. Escolher um elemento (componente) dentre os k elementos existentes na lista RCL e atualizar a solução em construção corrente com a adição da componente escolhida.
4. Se a solução em construção corrente representa uma solução factível, ou foi satisfeito o critério de parada, terminar com a fase construtiva. Caso contrário voltar a 2.

Da elaboração adequada da lista RLC depende o sucesso do algoritmo. Uma forma adequada para encontrar os elementos da lista RCL é utilizando uma função de mérito ou indicador de sensibilidade. A função de mérito chamada $h(x_i)$ na verdade representa qualquer estratégia que permita identificar a qualidade de uma decisão relacionada com a variação da função objetivo. Portanto, $h(x_i)$ pode ser obtida matematicamente de maneira formal ou pode representar apenas uma informação obtida de forma intuitiva ou da experiência do pesquisador. Considerando um problema de minimização da função objetivo $z(x)$, então a variável mais atraente, x_i , identificada por um algoritmo guloso, é aquela que apresenta um menor valor de $h(x_i)$. Portanto, a lista RCL seria construída como se mostra na equação (6). Analogamente pode ser inferida a construção de uma lista RCL para um problema de maximização.

$$RCL = \{i \in X / h_{min} \leq h(x_i) \leq h_{min} + \alpha (h_{max} - h_{min})\} \quad (6)$$

Aqui, α representa a relação de aleatoriedade que a escolha terá, sendo $\alpha = 0$ um processo guloso e $\alpha = 1$ um processo totalmente aleatório. O número de elementos do conjunto RCL varia em cada passo da fase construtiva. O tamanho da lista RCL depende do valor de α , mas

também depende dos valores de indicador de sensibilidade de cada elemento. Uma variação do GRASP é o GRASP reativo, e a diferença principal reside em que α varia a cada iteração da fase construtiva e, logicamente junto com α , a lista RCL torna-se variável.

Depois de sair da fase construtiva, entra-se na fase final do algoritmo. A fase de pós-processamento ou busca local. Inicialmente esta fase era feita por uma heurística de busca através de vizinhança. O propósito era achar uma solução ótima local na vizinhança da solução encontrada nas fases anteriores. A heurística SDH ou o processo de intensificação do TS foram utilizados. Em casos mais sofisticados meta-heurísticas tais como SA, AG, TB ou VNS vêm sendo usadas.

Resumindo, o GRASP consta de:

- Uma fase de pré-processamento com objetivo de incorporar ou descartar elementos que formam parte da solução ótima e, portanto, reduzindo o espaço de busca.
- Uma fase construtiva com o objetivo de gerar um conjunto elevado de soluções de qualidade usando uma mesma heurística construtiva.
- Uma fase de pós-processamento que, na verdade, é uma fase de melhoria da solução encontrada na fase construtiva que pode ser heurística SDH ou uma meta-heurísticas.

Esta meta-heurística foi escolhida para o desenvolvimento da nossa pesquisa. Na seguinte seção expõem-se as fases do algoritmo desenvolvido.

3.3.3 Estratégia Fundamental

Como já foi escrito, o problema de alocação ótima de equipamentos SVC e TCSC no sistema de transmissão de energia elétrica é um problema que, dependendo o tamanho do sistema, pode ter um número elevado de soluções. Dado que o esforço computacional para avaliar uma solução é considerável, não é viável avaliar todos os cenários possíveis. Com o objetivo de percorrer rapidamente o espaço de busca, renuncia-se ao fato de matematicamente procurar a solução global do problema e, de forma mais rápida, busca-se o ótimo global ou uma solução próxima com uma meta-heurística.

Na Figura 6 apresenta-se o diagrama de blocos do algoritmo criado para o nosso problema. O GRASP é a meta-heurística na qual o algoritmo é inspirado. A divisão das etapas da estratégia de solução desenvolvida na pesquisa não entra propriamente nos padrões básicos estabelecidos

em uma meta-heurística GRASP, no entanto, é importante destacar que o algoritmo foi inspirado e tem proximidade com essa meta-heurística.

Cada uma das fases será explicada com detalhe, o algoritmo pode-se dividir como segue:

- Uma fase preliminar: Nesta fase é inicializado o processo iterativo e avaliado o estado inicial do sistema.
- Uma fase de pré-processamento: Aqui se reduz a quantidade de vizinhos aos quais pode-se caminhar em uma determinada iteração.
- Uma fase construtiva: É a parte mais importante do algoritmo, em que se reduz a quantidade de indivíduos a serem analisados para se chegar mais rápido em soluções de boa qualidade.
- Uma fase ajuste local: Aqui essencialmente se ajustam os valores de X dos dispositivos, caminhando para os valores que melhoram a função objetivo.

A meta-heurística é repetida o tanto de vezes que for estabelecido pelo usuário. Quanto mais elevado for o número de iterações, maior a probabilidade de chegar ao ótimo global do problema.

3.3.3.1 Fase Preliminar

Na fase preliminar inicializa-se o processo iterativo. O processo iterativo é concluído quando o algoritmo alcança uma solução de pior qualidade. Aí, o processo vai ser reiniciado com o objetivo de seguir outro caminho dentro da região factível de soluções.

Avalia-se o estado inicial do sistema, calculando a função objetivo para um cenário inicial do sistema de transmissão. Este cenário é geralmente o sistema sem FACTS instalados.

3.3.3.2 Pré-processamento

Nesta etapa, define-se uma parte da solução ou indivíduo a ser analisado. Escolhe-se aleatoriamente entre instalar um SVC, instalar um TCSC ou realocar um dos equipamentos instalados. Logo, entra-se na construção do indivíduo para determinar completamente a nova solução proposta.

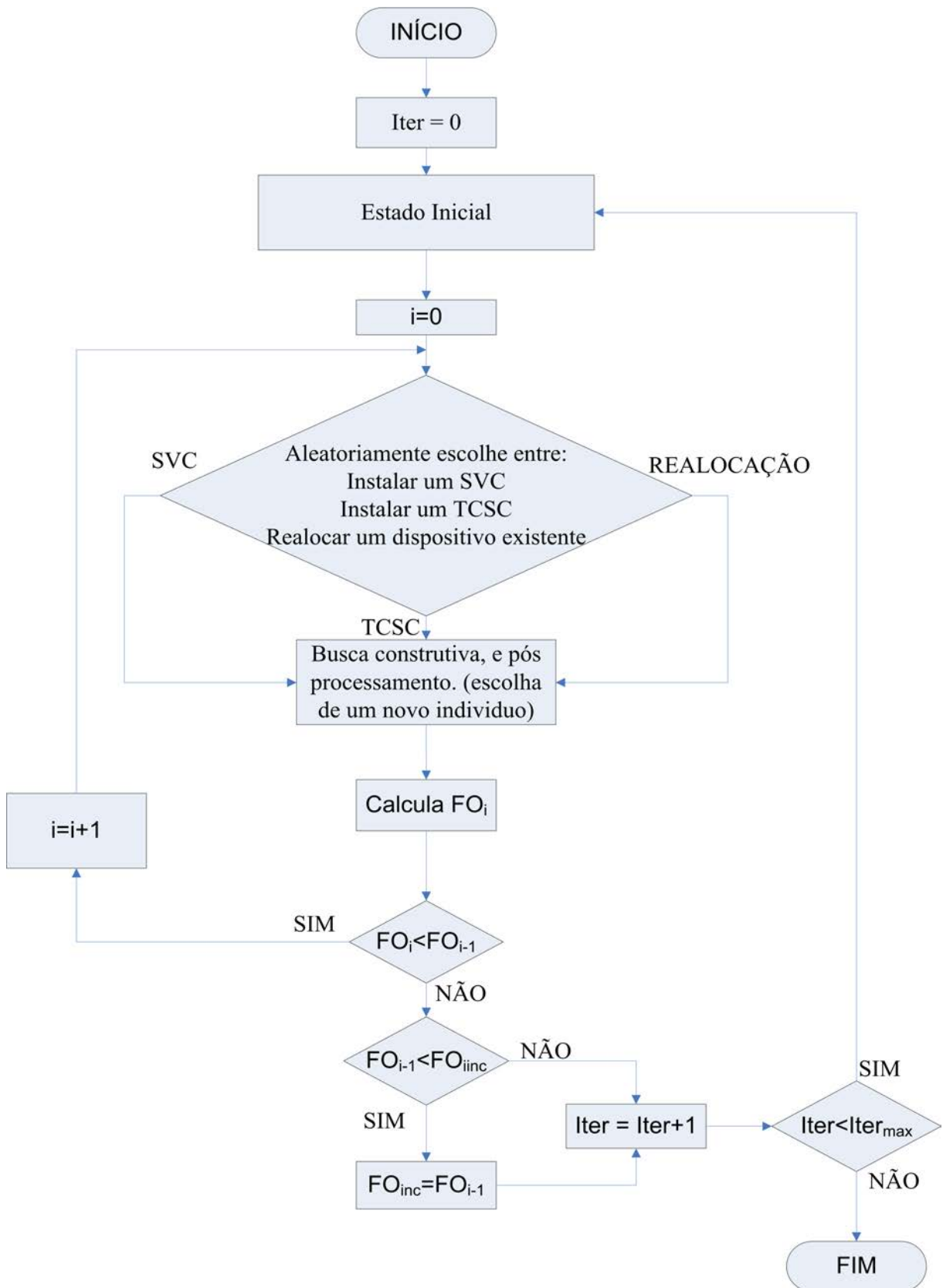
3.3.3.3 Fase Construtiva

Esta fase recebe da fase anterior qual é o tipo do equipamento que vai ser instalado, seja um novo equipamento ou um dos já instalados que vai ser realocado. Na Figura 7 tem-se o diagrama de blocos que ilustra a sequência de decisões que o algoritmo percorre.

Nesta fase decide-se onde vai ser alocado o dispositivo. Lembrando que o problema é alocação ótima de equipamentos FACTS na rede de transmissão, pode-se notar logicamente a importância desta fase no algoritmo.

Para decidir o local onde instalar o FACTS, o algoritmo nesta fase faz:

- Tira-se das opções as barras e/ou circuitos com equipamento já instalado.
- Ordenam-se de mais atrativo a menos atrativo as barras ou circuitos. Sendo as barras mais atrativas aquelas com a tensão mais afastadas a 1p.u. (para a instalação de SVC) e sendo os circuitos mais atrativos aqueles com maior valor de perdas (para a instalação de TCSC).
- Cria-se a lista RCL com o 30% superior das opções que foram ordenadas. Ou seja, $\alpha = 0,3$.
- Da RCL escolhe-se aleatoriamente o novo local.
- Instala-se o dispositivo no lugar indicado com $X = 0, 1$ e passa-se para a busca local.

Figura 6 - Diagrama de blocos do algoritmo de otimização.

Fonte: o próprio autor.

3.3.3.4 *Ajuste Local*

Já com o tipo de equipamento e o lugar onde vai ser instalado, esta fase começa buscar localmente um melhor valor para o X do dispositivo, lembrando que ele foi inicialmente instalado com $X = 0, 1$. Na Figura 8 mostra-se o diagrama de blocos da fase de ajuste local.

Se um dispositivo i vai ser instalado então tem-se $X = 0, 1$, mas, se o dispositivo i estava instalado o X_i desse dispositivo pode ser qualquer valor dentro da faixa estabelecida para o equipamento. Como o fato de ter outros dispositivos no sistema incide na qualidade da função objetivo com um novo equipamento instalado, então o ajuste local altera todos os valores de X para todos os equipamentos existentes no sistema de transmissão. Em outras palavras, o ajuste local varia todos os valores da quarta coluna da Tabela 2, o que representa uma busca na vizinhança do indivíduo entregue pela fase anterior.

O ajuste local para encontrar a melhor configuração dos valores dos parâmetros dos equipamentos faz o seguinte:

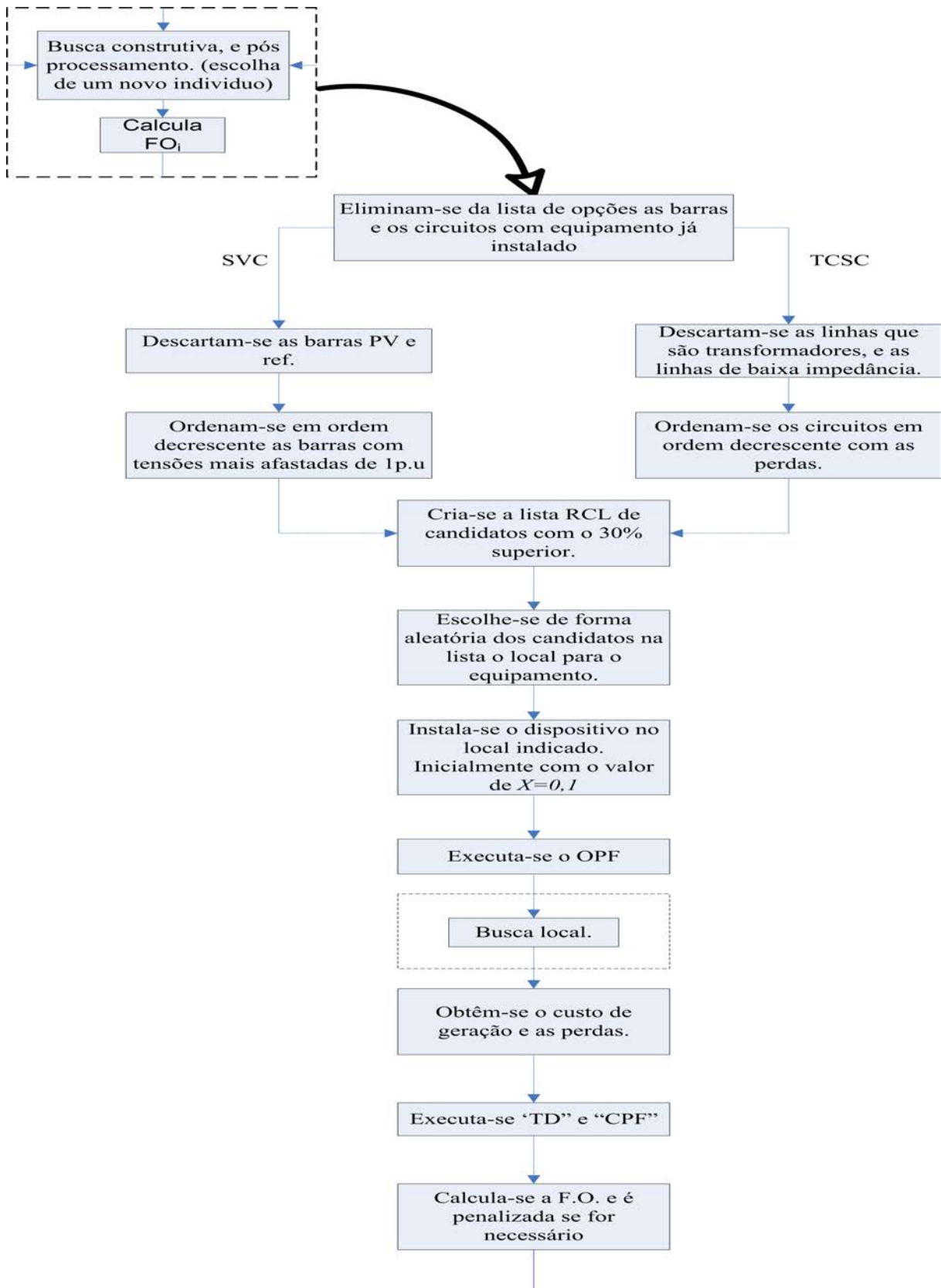
1. Os X de todos os dispositivos são reajustados.
2. Compara-se a nova configuração com aquelas configurações na lista de configurações bloqueadas. Se a configuração estiver bloqueada então, volta-se à configuração anterior e retorna-se a 1. Se não estiver bloqueada passa-se para 3.
3. Calcula-se a nova função objetivo. Se $FO_i < FO_{i-1}$ e o critério de parada não foi atingido passa-se a 1. Se $FO_i > FO_{i-1}$ e o critério de parada não foi atingido, passa-se a 4.
4. Armazena a configuração como bloqueada, volta-se à configuração anterior e passa-se para 1.

O critério de parada para esta fase é unicamente o número de iterações. Cada iteração é contada a partir de que se calcule a função objetivo para um indivíduo, sem importar se o indivíduo foi de melhor ou de pior qualidade.

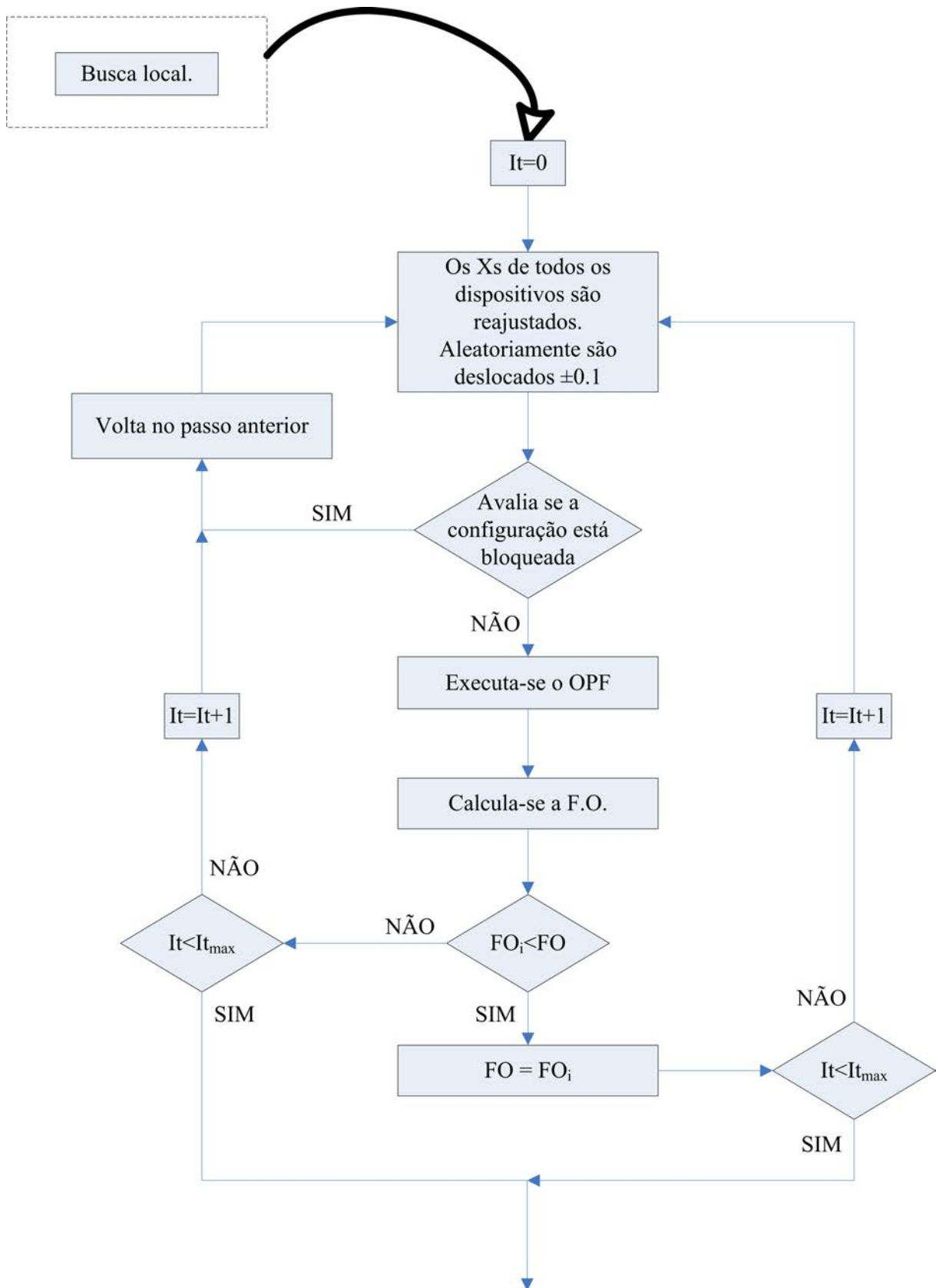
3.3.3.5 *Fase Final*

Finalmente, depois de obter o novo indivíduo, ele é comparado com o indivíduo anterior. Se o novo indivíduo é melhor, ele é comparado à incumbente e volta de novo à fase de pré-processamento. Se a função objetivo for melhor que a incumbente, atualiza-se a incumbente.

No caso que o indivíduo não seja melhor que o anterior, tem-se a indicação que a meta-heurística entrou em um caminho que não representa melhoria, portanto, retorna-se ao estado inicial.

Figura 7 - Diagrama de fluxo da fase de construção do indivíduo.

Fonte: o próprio autor.

Figura 8 - Diagrama de fluxo do ajuste local.

Fonte: o proprio autor.

3.4 FERRAMENTAS (PSAT)

Na seguinte seção apresenta-se o toolbox PSAT. Este toolbox foi utilizado para avaliar as rotinas no sistema teste. Aqui se explica como o programa executa as rotinas, quais modelos matemáticos utiliza, assim como as vantagens e desvantagens que apresenta.

3.4.1 PSAT

Atualmente têm-se dois tipos de software para a análise de sistemas elétricos de potência, software comerciais e softwares educacionais. Os softwares comerciais têm a característica de serem fechados, não permitem mudanças nos códigos ou uma eventual implementação de um algoritmo novo. Do outro lado, os softwares educacionais visam aspectos específicos dentro da análise do sistema elétrico de potência. Os softwares educacionais são geralmente abertos e acrescentar ou modificar os códigos dentro não é um problema. Mas, é sempre necessário ter um vasto conhecimento da estrutura do programa assim como da linguagem de programação utilizada (MILANO, 2006)

O PSAT (*Power System Analysis Toolbox*) é um toolbox de Matlab para a análise e controle de sistemas elétricos de potência. O PSAT é distribuído livremente em Milano (2013). A Tabela 3 descreve as rotinas que o toolbox possui e faz uma pequena comparação do PSAT contra outros softwares comumente utilizados.

Tabela 3 - Pacotes baseados em Matlab para a análise de sistemas elétricos de potência.

Softwares	PF	CPF	OPF	SSA	TD	EMT	GUI	GNE
EST	✓			✓	✓			
MatEMTP					✓	✓	✓	✓
MatPower	✓		✓					
PAT	✓			✓	✓			✓
PSAT	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
PST	✓	✓		✓	✓			
SPS	✓			✓	✓	✓	✓	✓
VST	✓	✓		✓	✓		✓	

Fonte: Milano (2006).

As análises e características apresentadas na Tabela 3 são mostradas na Tabela 4.

Milano (2006) expõe que o núcleo do PSAT é o algoritmo PF que também faz a inicialização das variáveis estáticas. Assim que o PF for resolvido, o usuário pode realizar outras análises tanto dinâmicas quanto estáticas. Estas análises são CPF, OPF, SSSA e TD.

Tabela 4 - Análises e características apresentadas na Tabela 3

Características	Abreviação
Fluxo de potência	PF
Fluxo de potência continuado	CPF
Fluxo de potência ótimo	OPF
Análise de estabilidade de pequeno sinal	SSA
Análise no domínio do tempo	TD
Interfaz gráfica	GUI
Editor gráfico de redes	GNE

Fonte: Milano (2006).

Para realizar análises precisas e completas no sistema de potência, PSAT suporta uma variedade de modelos estáticos e dinâmicos, como segue:

- Fluxo de potência: Barras, linhas de transmissão e transformadores, barras de referência, geradores fotovoltaicos, cargas constantes e admitâncias em derivação (shunt).
- Dados do Mercado: Limites de geração de potência, reservas nos geradores e limites na demanda de potência.
- Chaves: Faltas e chaves nas linhas de transmissão.
- Recoleta de dados: Medições de frequência nas barras.
- Cargas: Cargas dependentes da tensão, cargas dependentes da frequência, cargas ZIP, cargas de recuperação exponencial e cargas dependentes da temperatura.
- Máquinas: Máquinas síncronas (com uma ordem dinâmica de 2 até 8) e motores de indução (com ordem dinâmica desde 1 até 5).
- Controles: Governador da turbina, AVRs, PSSs, limites de sobre-excitação e reguladores de tensão secundária.
- Transformadores de regulação: Comutadores de tap com carga, transformadores defasadores.
- FACTS: SVCs, TCSCs, SSSCs, UPFCs.
- Turbinas de vento: Modelos de vento, turbinas de vento de velocidade constante com motor de indução de gaiola de esquilo, turbina de vento de velocidade variável com gerador de indução duplamente alimentado e turbina de vento com velocidade variável com gerador síncrono de acionamento direto.

- Outros modelos: Máquina síncrona de eixo dinâmico, modelos de ressonância subsíncrona, células de combustível de óxido sólido e áreas de subtransmissão equivalentes.

Além dos algoritmos e modelos matemáticos, o PSAT inclui várias ferramentas adicionais:

- Interfaces gráficas.
- Bibliotecas de Simulink para o desenho de redes unifilares.
- Conversão de dados para e desde outros formatos.
- Modelo de editor e instalador definido pelo usuário.
- Utilização por linha de comando.

Nas seguintes seções realiza-se uma descrição das rotinas que são utilizadas nesta pesquisa e explica-se como são desenvolvidas dentro do toolbox. O formato no qual devem ser ordenados os dados do sistema para serem ingressados no PSAT estão nas tabelas no ANEXO A. Os modelos matemáticos que utiliza o PSAT serão explicados no ANEXO B*.

3.4.1.1 PF

O fluxo de potência do PSAT representa o núcleo do programa e é responsável pela inicialização das variáveis estáticas. Assim, no algoritmo o PF é executado antes de cada uma das outras rotinas e depois de cada mudança nos dados do sistema (executa-se o PF cada vez que varia o valor do X de cada equipamento). Para solucionar o PF, o PSAT tem diferentes algoritmos. Nesta pesquisa é utilizado o método de Newton-Raphson.

Para executar o PF precisa-se dos seguintes dados:

- Dados das barras, Tabela 10.
- Dados das linhas, Tabela 11.
- Dados da barra de referência, Tabela 12.
- Dados dos transformadores, Tabela 13.
- Dados das barras PV, Tabela 14.
- Dados das barras PQ, Tabela 15.

3.4.1.2 OPF

O fluxo de potência ótimo é um problema de otimização não linear. É resolvido pelo PSAT usando o método de pontos interiores e método preditor-corretor. (MILANO, 2006)

O PSAT apresenta três opções de otimização para o OPF: Maximização do benefício social, maximização da margem de segurança e otimização multiobjetivo. Para esta pesquisa utiliza-se o máximo benefício social como objetivo do OPF.

O OPF para maximização do benefício social é modelado como um problema de minimização, onde tenta-se reduzir a diferença entre o custo da potência gerada e o custo da potência demandada. Fixando a demanda com um valor alto, desse modo toda a demanda deve ser suprida. Assim, tem-se um modelo no qual a potência demandada é fixa e o OPF terá então que reduzir o custo total de geração.

Uma das principais limitantes do OPF no PSAT é que não admite dispositivos componentes dinâmicos, é por isso que os equipamentos FACTS têm que ser modelados como cargas em derivação (*shunt*). Depois de executar o OPF obtém-se o custo total de geração e as perdas totais no sistema. Para executar o OPF precisa-se de:

- Executar o PF.
- Dados da oferta, Tabela 17.
- Dados da demanda, Tabela 18.

Para incluir os equipamentos FACTS os dados têm que ser inseridos como especificado na Tabela 16 para uma carga em derivação.

3.4.1.3 CPF

O fluxo de potência continuado no PSAT utiliza um algoritmo preditor-corretor. É usado para encontrar o índice de máximo carregamento. O CPF admite sim dispositivos dinâmicos.

Na solução do problema de alocação ótima de FACTS é usado o CPF para avaliar que a solução proposta acrescenta o índice de máximo carregamento pelo menos em um Δ definido pelo usuário. Portanto, compara-se o α inicial, ou seja sem FACTS no sistema, com o α_i que corresponde à proposta de solução i .

Para executar o CPF com FACTS, os dados dos equipamentos têm que ser inseridos no sistema como especificado nas Tabelas 21 e 22.

3.4.1.4 TD

A análise no domínio do tempo é resolvida pelo método de integração de Euler. No PSAT também estão disponíveis outros métodos para a resolução do TD. Simulam-se faltas numa determinada barra que abrem uma determinada linha.

Um número específico de faltas são simuladas no sistema já com os FACTS instalados. Em todas as faltas, o sistema sem equipamentos perde a estabilidade. Não serão penalizadas unicamente aquelas soluções que consigam livrar pelo menos um número mínimo de faltas. Esse número mínimo \overline{If} é especificado pelo usuário.

Para executar o TD precisa-se de:

- executar o PF.
- Dados das máquinas síncronas, Tabela 23.
- Dados das faltas, Tabela 19.
- Dados das chaves (*breakers*), Tabela 20.

3.4.2 FACTS

Esta seção trata como são modelados os equipamentos FACTS dentro do toolbox. Apresentam-se especificamente os modelos do SVS e do TCSC, porém, o software possui outros além dos mencionados:

- Sistema de transmissão de alta tensão em corrente contínua, HVDC
- Compensador estático síncrono, STATCOM
- Compensador série síncrono estático, SSSC
- Controlador unificado de fluxo de potência, UPFC

Cada modelo pode ser descrito com o conjunto de equações algébricas mostradas em (7), (MILANO, 2007).

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_c &= f_c(x_c, x_s, V, \theta, u) \\
 \dot{x}_s &= f_s(x_c, x_s, V, \theta) \\
 P &= g_p(x_c, x_s, V, \theta) \\
 Q &= g_q(x_c, x_s, V, \theta)
 \end{aligned} \tag{7}$$

onde x_c são as variáveis de controle do sistema, x_s são as variáveis de estado e as variáveis algébricas V e θ são as amplitudes e ângulos das tensões nas barras onde os equipamentos estão conectados, estas variáveis são vetores nos casos de componentes série. Finalmente, as variáveis u representam a entrada dos parâmetros de controle.

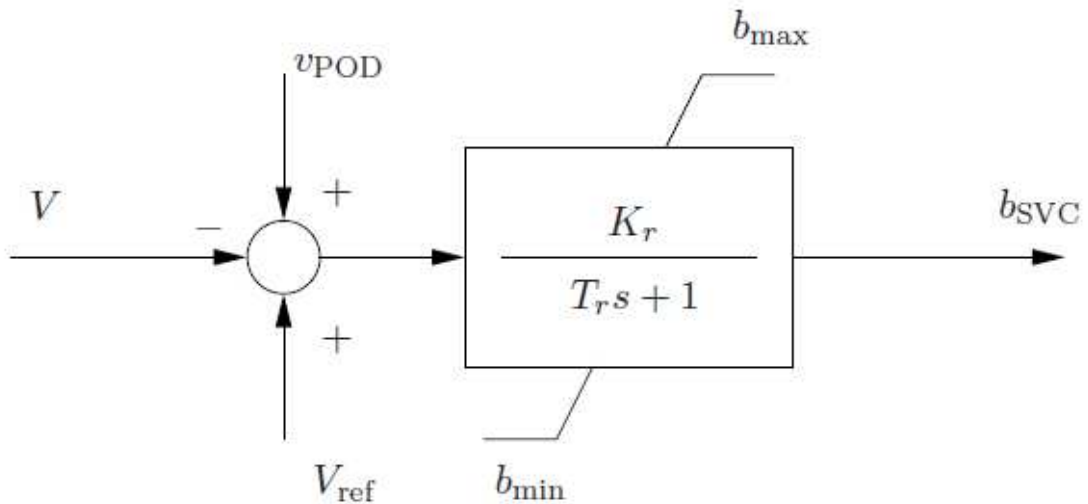
3.4.2.1 SVC

Dois reguladores SVC são implementados no programa. O primeiro tipo (modelo utilizado nesta pesquisa) assume um regulador de tempo constante, assim como o mostrado na figura 9. Neste modelo, é assumida uma susceptância total b_{SVC} , tendo a equação diferencial apresentada em (8).

$$\dot{b}_{SVC} = [K_r (V_{ref} + v_{pod} - V) - b_{SVC}] / T_r \quad (8)$$

Completa-se este modelo com a expressão algébrica que expressa a injeção de potência reativa do SVC na barra, equação (1). A tabela 21 do Anexo A apresenta a forma como devem ser inseridos os dados de um equipamento SVC no PSAT (MILANO, 2007).

Figura 9 - Regulador SVC Tipo 1.



Fonte: Milano (2007).

3.4.2.2 TCSC

O regulador do TCSC é apresentado na Figura 10. Sendo que o sistema segue as equações algébricas mostradas em (9).

$$\begin{aligned}
 P_{km} &= V_k V_m (Y_{km} + B) \sin(\theta_k - \theta_m) \\
 P_{mk} &= -P_{km} \\
 Q_{km} &= V_k^2 (Y_{km} + B) - V_k V_m (Y_{km} + B) \cos(\theta_k - \theta_m) \\
 Q_{mk} &= V_m^2 (Y_{km} + B) - V_k V_m (Y_{km} + B) \cos(\theta_k - \theta_m)
 \end{aligned} \tag{9}$$

onde k e m são as barras de início e fim, respectivamente, e Y_{km} é a admitância da linha onde o TCSC é conectado.

As equações diferenciais do TCSC são mostradas em (10).

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= (\{x_{c0}, \alpha_0\} + K_r v_{POD} - x_1) / T_r \\
 \dot{x}_2 &= K_I (P_{km} - P_{ref})
 \end{aligned} \tag{10}$$

sendo

$$\{x_{c0}, \alpha_0\} = K_P (P_{km} - P_{ref}) + x_2 \tag{11}$$

A variável de estado $x_1 = \{x_c, \alpha_0\}$ depende do modelo do TCSC. Para esta pesquisa foi utilizado sempre o modelo tipo 1, portanto, aplica-se $x_1 = \{x_c\}$.

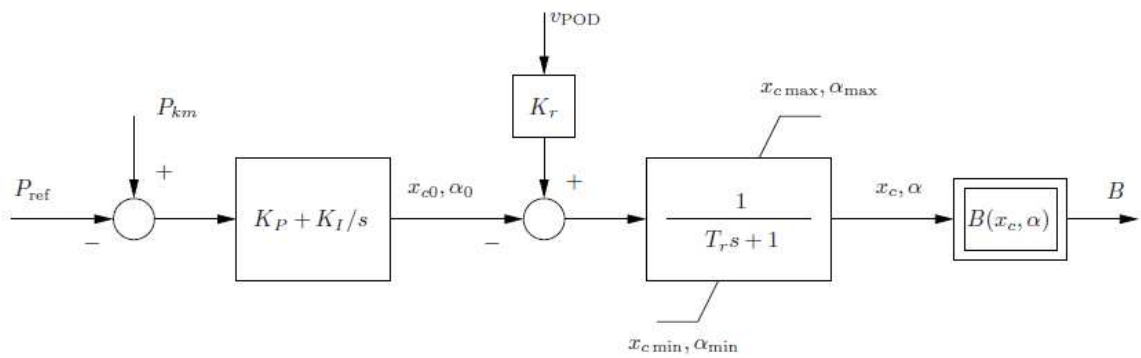
O sinal de saída do TCSC é a susceptância série B, mostrada em (12).

$$B(x_c) = -\frac{x_c/x_{km}}{x_{km}(1 - x_c/x_{km})} \tag{12}$$

Durante a análise do fluxo de potência, o TCSC é modelado como uma reatância capacitiva constante que muda o valor de x_{km} , como se vê na equação (13).

$$x'_{km} = (1 - c_p) x_{km} \tag{13}$$

onde c_p é a porcentagem de compensação série. A Tabela 22 do Anexo A mostra como são inseridos os dados de um equipamento TCSC ao *software*.

Figura 10 - Regulator TCSC.

Fonte: Milano (2007).

4 TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os testes desenvolvidos e os resultados obtidos pela pesquisa.

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS E SISTEMAS TESTE

Diferentes parâmetros devem ser fixados para avaliar a função objetivo de um indivíduo ou proposta de solução. Para cada teste tem-se:

IT_{max} : número de iterações máximo, definido pelo usuário;

(w_1, w_2, w_3) : pesos definidos pelo usuário;

CG_i : calculado pelo toolbox para cada caso;

C_{svc} : parâmetro fixo, que foi baseado em uma fórmula de custo apresentada por Dahej, Esmaeili e Goroohi (2012);

C_{csc} : parâmetro fixo, que foi baseado em uma fórmula de custo apresentada por Dahej, Esmaeili e Goroohi (2012);

N_{svc} : varia com cada indivíduo e é definido pela meta-heurística;

N_{csc} : varia com cada indivíduo e é definido pela meta-heurística;

Per_i : calculado pelo toolbox para cada caso;

$\Delta\lambda$: calculado pelo toolbox para cada caso;

$\overline{\Delta\lambda}$: definido pelo usuário;

If_i : calculado pelo toolbox para cada caso;

\overline{If} : definido pelo usuário;

(p_1, p_2) : definidos pelo usuário;

São estabelecidos também os parâmetros que ficaram mantidos nas avaliações realizadas:

C_{svc} : \$127,100.00

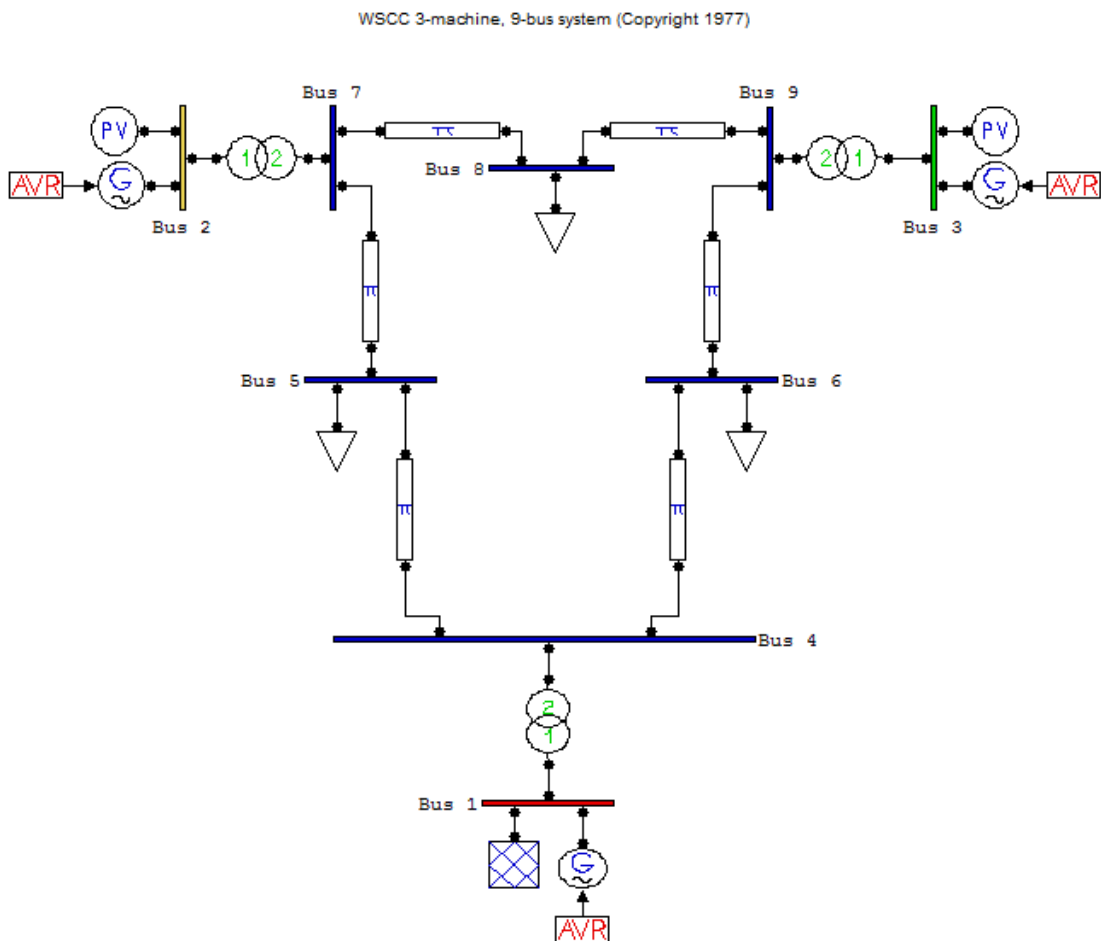
C_{csc} : \$153,700.00

Os sistemas testes utilizados foram:

- O sistema de 9 barras apresentado por Anderson e Fouad (2003).
- O sistema teste New England de 39 barras.

Além disso, assume-se que o custo dos dispositivos é por uma quantidade determinada de anos. Portanto, o custo total de geração e as perdas serão projetados com custos para cinco anos no sistema de 9 barras e projetados com custos para três anos no sistema de 39 barras. Nas Figuras 11 e 12 são mostrados os diagrama dos sistemas em Simulink.

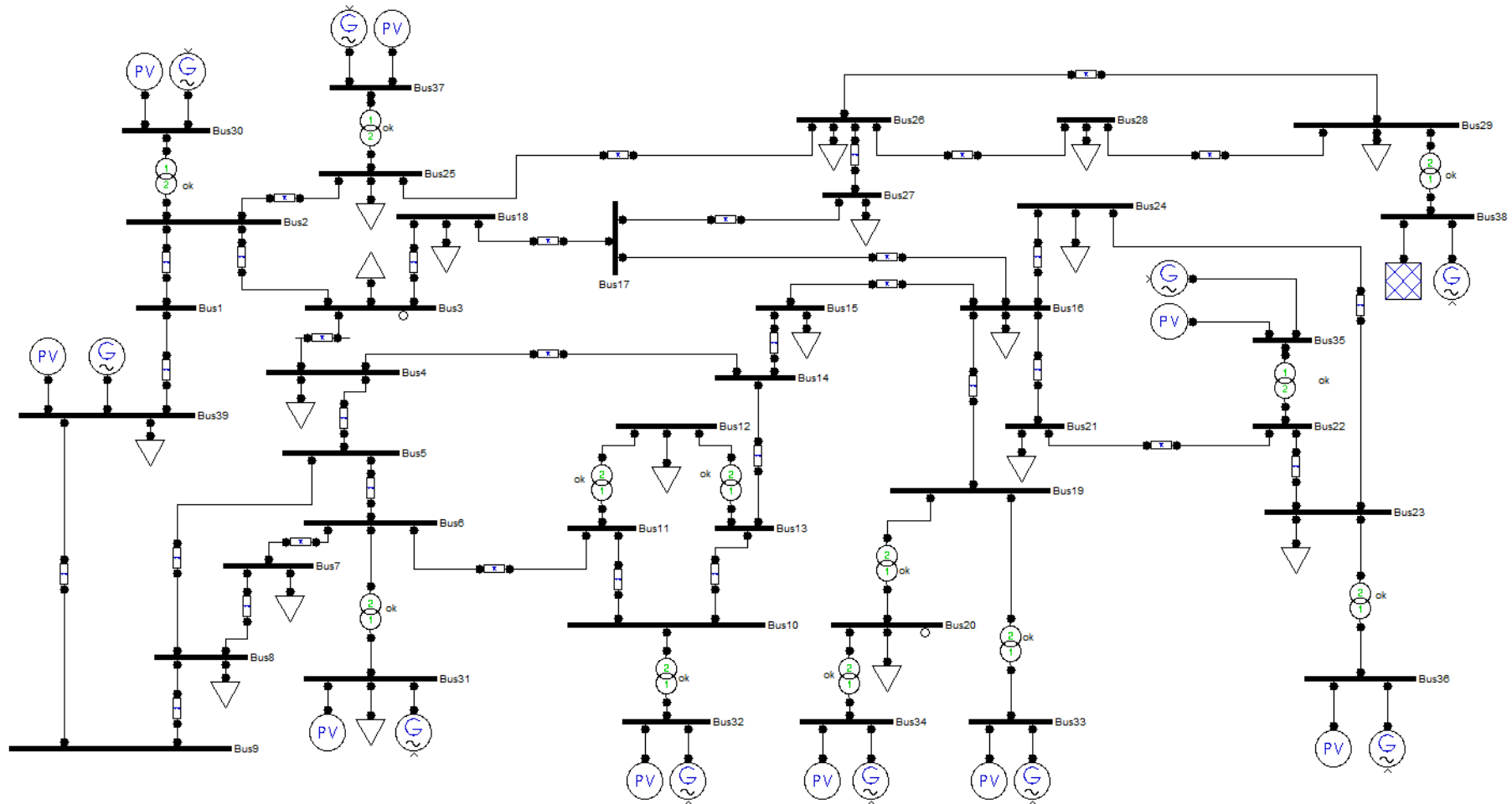
Figura 11 - Sistema teste de 9 barras.



Fonte: Milano (2013).

Na Figura 13 tem-se o sistema no arquivo .m ordenado para o PSAT, o arquivo para o sistema New England segue o mesmo formato e é apresentado no Anexo C deste documento. O formato dos dados dos sistemas requerido pelo PSAT é apresentado no ANEXO A.

Figura 12 - Sistema teste New England de 39 barras.



Fonte: Milano (2013).

Figura 13 - Sistema teste 9 barras no PSAT

```

Bus.con = [ ...
  1 16.5 1 0 4 1;
  2 18 1 0 5 1;
  3 13.8 1 0 3 1;
  4 230 1 0 2 1;
  5 230 1 0 2 1;
  6 230 1 0 2 1;
  7 230 1 0 2 1;
  8 230 1 0 2 1;
  9 230 1 0 2 1;
];

Line.con = [ ...
  9 8 100 230 60 0 0 0.0119 0.1008 0.209 0 0 0 0 0 1;
  7 8 100 230 60 0 0 0.0085 0.072 0.149 0 0 0 0 0 1;
  9 6 100 230 60 0 0 0.039 0.17 0.358 0 0 0 0 0 1;
  7 5 100 230 60 0 0 0.032 0.161 0.306 0 0 0 0 0 1;
  5 4 100 230 60 0 0 0.01 0.085 0.176 0 0 0 0 0 1;
  6 4 100 230 60 0 0 0.017 0.092 0.158 0 0 0 0 0 1;
  2 7 100 18 60 0 0.07826087 0 0.0625 0 0 0 0 0 0 1;
  3 9 100 13.8 60 0 0.06 0 0.0586 0 0 0 0 0 0 1;
  1 4 100 16.5 60 0 0.07173913 0 0.0576 0 0 0 0 0 0 1;
];

SW.con = [ ...
  1 100 16.5 1.04 0 99 -99 1.1 0.9 0.8 1 1 1;
];

PV.con = [ ...
  2 100 18 1.63 1.025 99 -99 1.1 0.9 1 1;
  3 100 13.8 0.85 1.025 99 -99 1.1 0.9 1 1;
];

PQ.con = [ ...
  6 100 230 0.9 0.3 1.2 0.8 0 1;
  8 100 230 1 0.35 1.2 0.8 0 1;
  5 100 230 1.25 0.5 1.2 0.8 0 1;
];

Syn.con = [ ...
  1 100 16.5 60 4 0 0 0.146 0.0608 0 8.96 0 0.0969 0.0969 0 0.31 0 47.28 0 0 0 1 1 0.002 0 0 1 1;
  2 100 18 60 4 0 0 0.8958 0.1198 0 6 0 0.8645 0.1969 0 0.535 0 12.8 0 0 0 1 1 0.002 0 0 1 1;
  3 100 13.8 60 4 0 0 1.3125 0.1813 0 5.89 0 1.2578 0.25 0 0.6 0 6.02 0 0 0 1 1 0.002 0 0 1 1;
];

Exc.con = [ ...
  1 2 5 -5 20 0.2 0.063 0.35 1 0.314 0.001 0.0039 1.555;
  2 2 5 -5 20 0.2 0.063 0.35 1 0.314 0.001 0.0039 1.555;
  3 2 5 -5 20 0.2 0.063 0.35 1 0.314 0.001 0.0039 1.555;
];

Bus.names = {...
  'Bus 1'; 'Bus 2'; 'Bus 3'; 'Bus 4'; 'Bus 5';
  'Bus 6'; 'Bus 7'; 'Bus 8'; 'Bus 9'};

```

Fonte: Milano (2013).

4.2 TESTES

Apresentam-se neste trabalho o caso base para ambos sistemas sem equipamentos instalados.

1. Caso 1:

Sistema de 9 barras.

$$(w_1, w_2, w_3) = (1, 1, 1);$$

$$IT_{max} = 1000$$

$$(p_1, p_2) = (0, 0)$$

2. Caso 2:

Sistema de 9 barras.

$$(w_1, w_2, w_3) = (1, 1, 1);$$

$$IT_{max} = 1000$$

$$(p_1, p_2) = (1, 1) * 1,5 \times 10^6$$

$$\bar{I}f = 0,5$$

$$\overline{\Delta\lambda} = 0,05$$

3. Caso 3:

Sistema New England.

$$(w_1, w_2, w_3) = (1, 1, 1);$$

$$IT_{max} = 2000$$

$$(p_1, p_2) = (1, 1) * 1,5 \times 10^8$$

$$\bar{I}f = 0,2$$

$$\overline{\Delta\lambda} = 0,005$$

Para cada caso é apresentado:

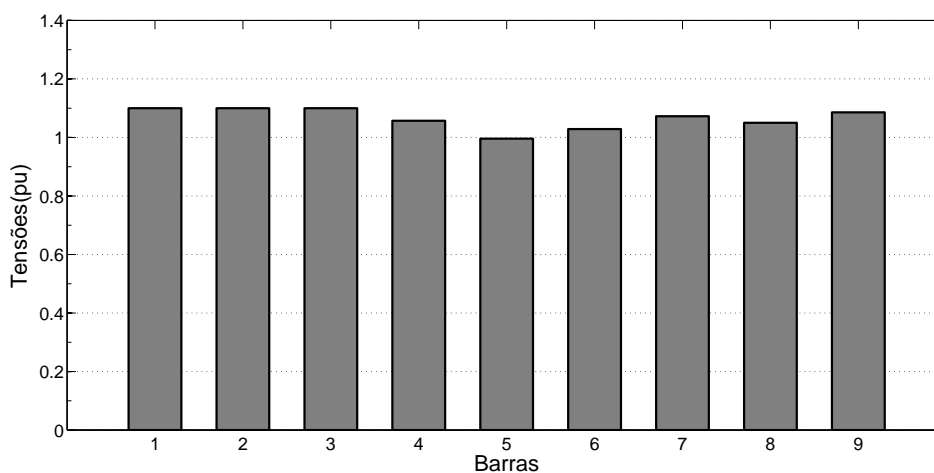
- Indivíduo escolhido;
- O valor da função objetivo;
- Gráfico das tensões nas barras;
- Os fluxos nas linhas;
- Comportamento dos ângulos dos geradores antes, durante e depois das faltas, quando $p_2 \neq 0$.

4.3 CASOS BASE

Caso Base: sistema de 9 barras

A função objetivo do modelo apresentado em (4) no caso base é de \$61.527.782,54. Na Figura 14 e na Tabela 5 são apresentadas em p.u. as tensões e as magnitudes das correntes nos circuitos, respectivamente.

Figura 14 - Gráfico das tensões caso base, sistema de 9 barras.



Fonte: do próprio autor.

Tabela 5 - Fluxos de corrente nas linhas no caso base em módulo e expressas em p.u. no sistema de 9 barras.

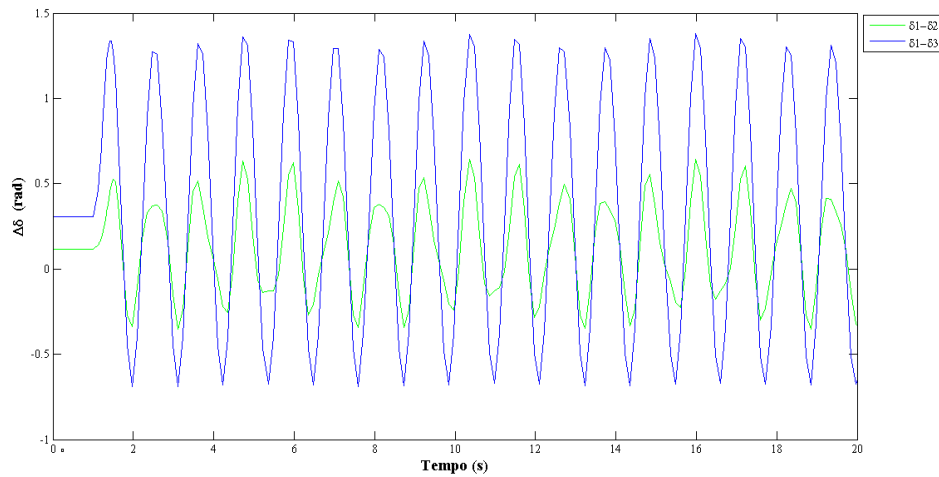
Barra i	Barra j	I_{ij}	I_{ji}
9	8	0,439965	0,573964
7	8	0,883906	0,919694
9	6	0,805174	0,870595
7	5	1,127126	1,193989
5	4	1,029047	0,911514
6	4	0,533762	0,458256
2	7	2,011005	2,011005
3	9	1,214746	1,214746
1	4	1,353875	1,353875

Fonte: do próprio autor.

Quatro faltas são testadas no sistema de 9 barras, sendo somente uma delas estável sem equipamentos instalados no sistema. As Figuras 15, 16, 17 e 18, mostram o comportamento dos ângulos dos geradores para as faltas 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Considera-se que o sistema

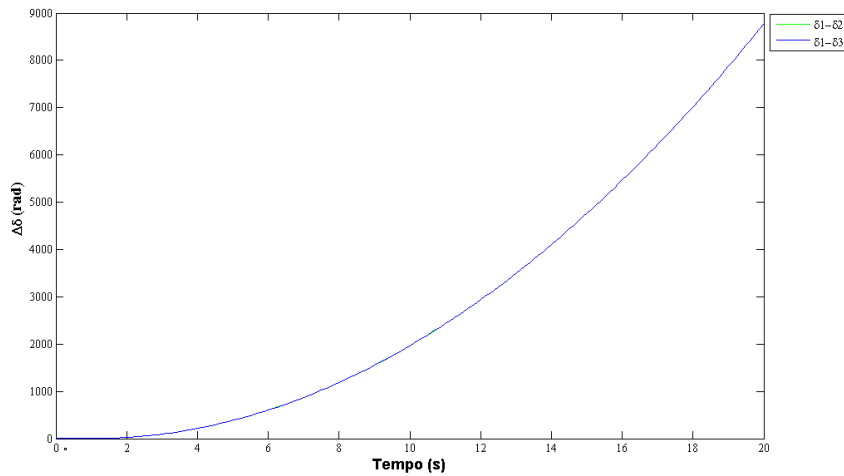
perde a estabilidade se a diferença angular em pelo menos um dos sincronizadores ultrapassa o limite de 90° ou $\pi/2\text{rad}$.

Figura 15 - Falta # 1, sistema de 9 barras: Barra 5, Linha 5.

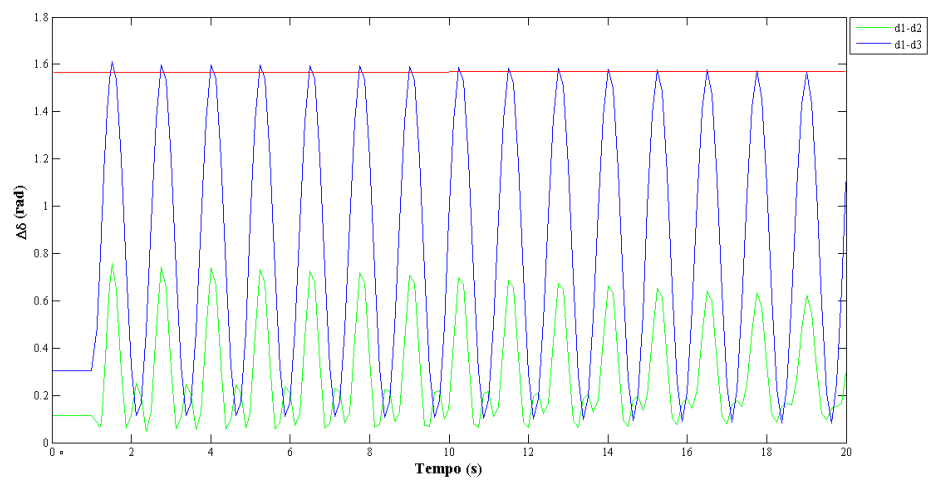


Fonte: do próprio autor.

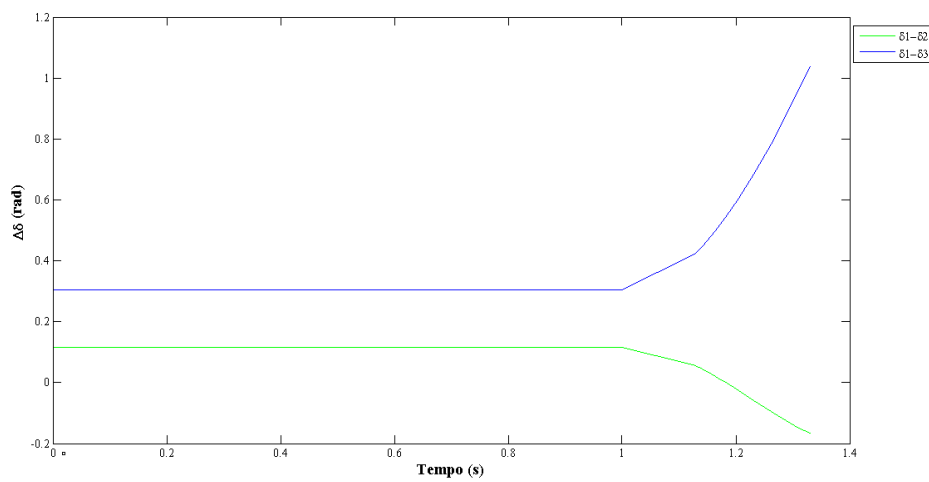
Figura 16 - Falta # 2, sistema de 9 barras: Barra 7, Linha 4.



Fonte: do próprio autor.

Figura 17 - Falta # 3, sistema de 9 barras: Barra 4, Linha 5.

Fonte: do próprio autor.

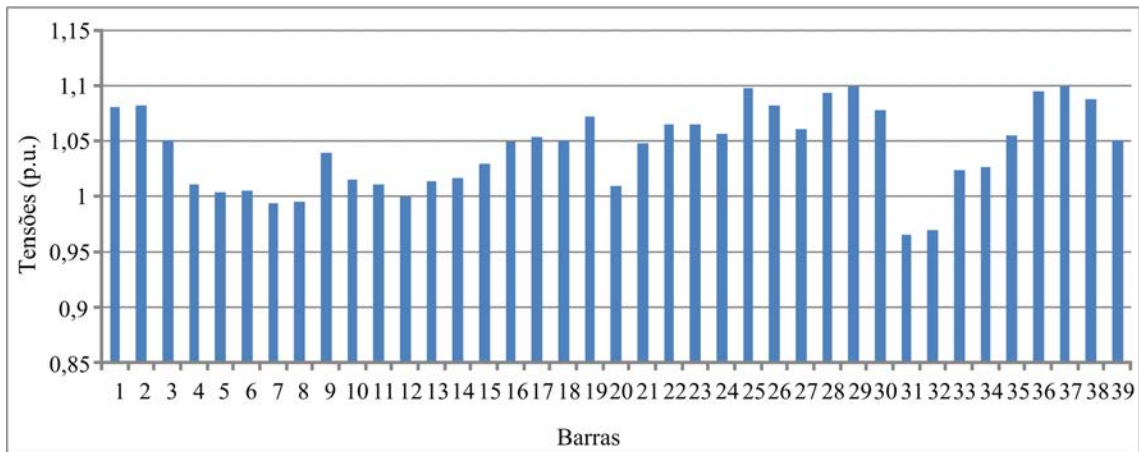
Figura 18 - Falta # 4, sistema de 9 barras: Barra 6, Linha 3.

Fonte: do próprio autor.

Caso Base: New England de 39 barras.

A função objetivo do modelo apresentado em (4) no caso base é de \$186.205.346,17 . Analogamente ao caso anterior, na Figura 19 e na Tabela 6 são apresentadas em p.u. as tensões e as magnitudes das correntes nos circuitos, respectivamente.

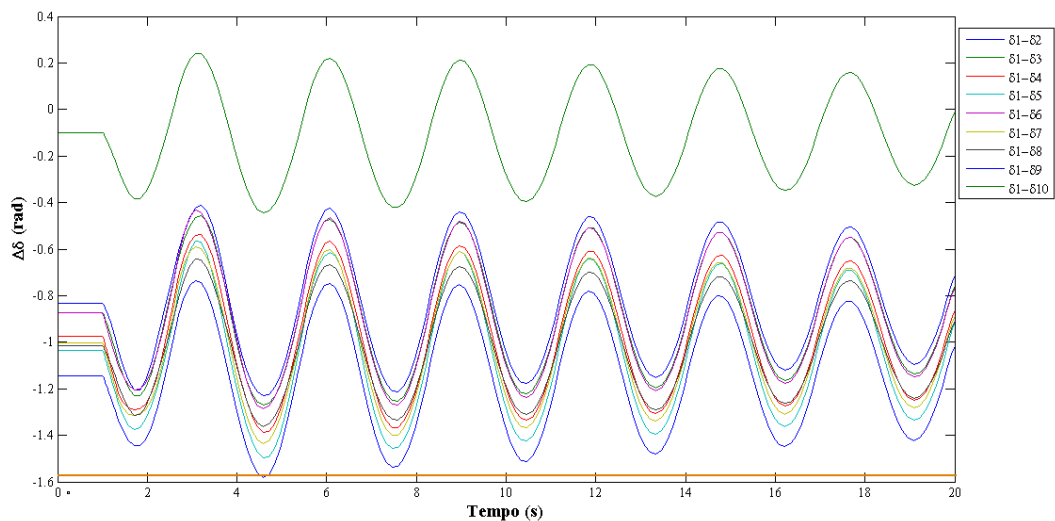
Figura 19 - Gráfico das tensões caso base, sistema New England.



Fonte: do próprio autor.

Cinco faltas são testadas no sistema New England de 39 barras, nenhuma delas estável sem equipamentos instalados no sistema. As Figuras 20, 21, 22, 23 e 24, mostram o comportamento dos ângulos dos geradores para cada falta.

Figura 20 - Falta # 1, sistema New England: Barra 15, Linha 20.

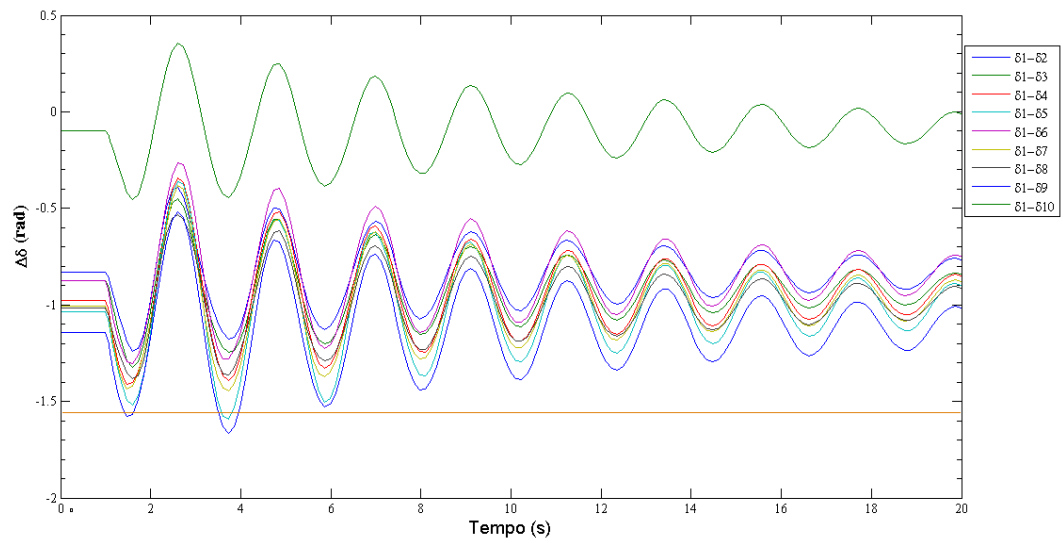


Fonte: do próprio autor.

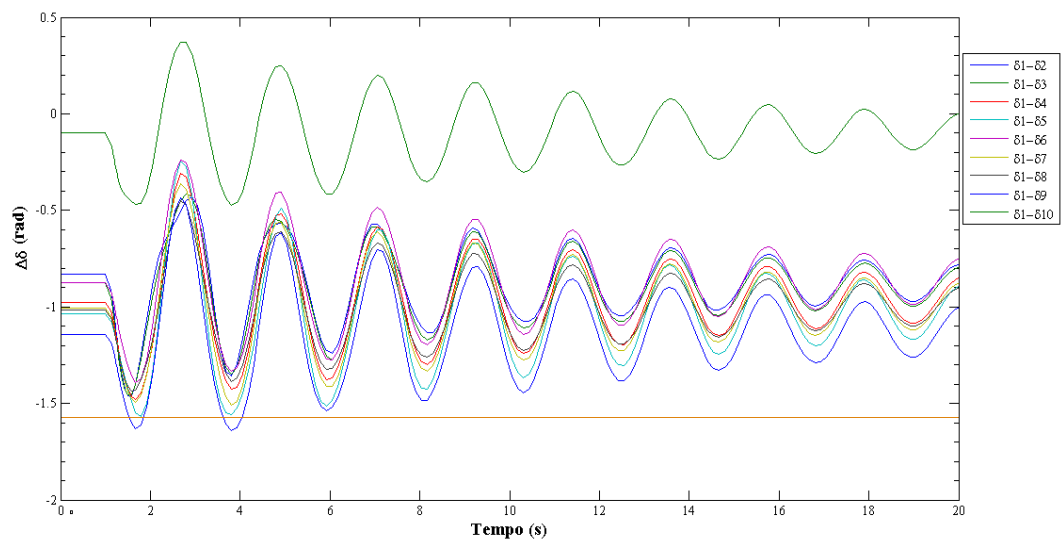
Tabela 6 - Fluxos de corrente no caso base, sistema NE.

Barra i	Barra j	I_{ij}	I_{ji}
1	2	0,691431	0,695013
1	39	0,691841	0,962813
2	3	6,187503	6,258226
2	25	1,966146	1,943366
3	4	2,37113	2,537108
3	18	0,919077	0,88597
4	5	1,22078	1,279747
4	14	2,151573	2,126135
5	6	4,373604	4,373657
5	8	3,301094	3,328402
6	7	4,806988	4,827353
6	11	3,46377	3,450072
7	8	0,928394	0,912774
8	9	2,0388	1,808464
9	39	1,808381	1,513469
10	11	3,514048	3,528793
10	13	2,958361	2,955144
13	14	2,94965	2,916871
14	15	1,150039	0,906591
15	16	3,057235	2,944384
16	17	0,560802	0,439467
16	19	4,086124	4,022917
16	21	2,268458	2,297743
16	24	1,073793	1,002546
17	18	0,638892	0,68954
17	27	0,634143	0,402377
21	22	5,422952	5,378183
22	23	0,829729	0,834595
23	24	2,807073	2,81576
25	26	1,35674	1,50098
26	27	4,483956	4,544838
26	28	2,393525	2,382223
26	29	2,835068	2,831535
28	29	4,250293	4,254084
2	30	4,700627	4,818143
6	31	2,83373	3,032092
6	31	2,83373	3,032092
10	32	6,422255	6,871813
12	11	0,398323	0,400712
12	13	0,486769	0,48969
19	20	1,921613	2,03691
19	33	5,927881	6,342833
20	34	5,280472	5,327996
22	35	6,182085	6,336637
23	36	5,286854	5,286854
25	37	5,366106	5,500259
29	38	9,659753	9,901247

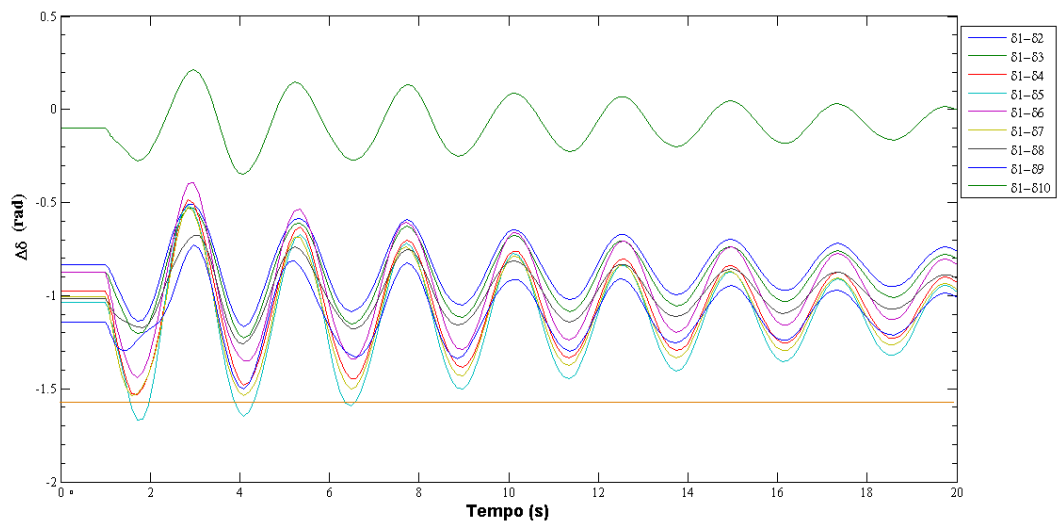
Fonte: do próprio autor.

Figura 21 - Falta # 2, sistema New England: Barra 17, Linha 26.

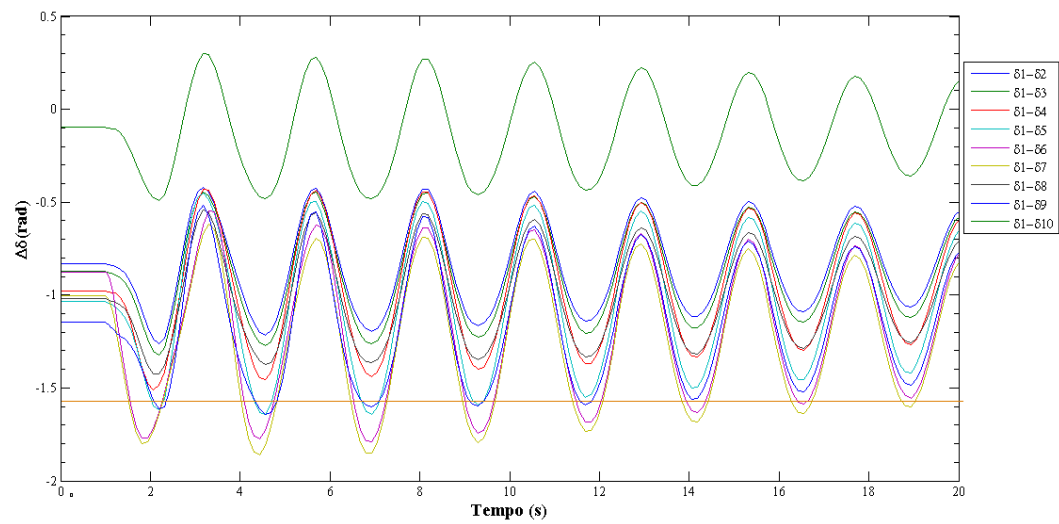
Fonte: do próprio autor.

Figura 22 - Falta # 3, sistema New England: Barra 9, Linha 14.

Fonte: do próprio autor.

Figura 23 - Falta # 4, sistema New England: Barra 21, Linha 27.

Fonte: do próprio autor.

Figura 24 - Falta # 5, sistema New England: Barra 27, Linha 31.

Fonte: do próprio autor.

4.4 RESULTADOS

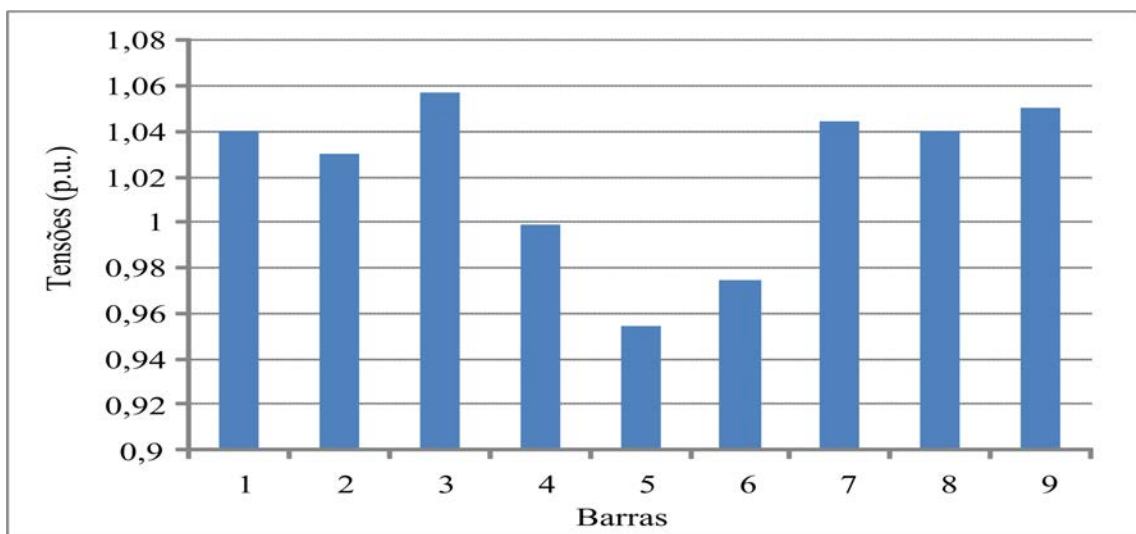
Caso 1

Neste caso a meta-heurística alocou três equipamentos:

- Um SVC na barra 7 com $X = 0,5$.
- Um SVC na barra 8 com $X = 0,5$.
- Um TCSC no circuito 5 com $X = -0,3$.

A função objetivo foi de \$ 60.140.485,15, o que significa uma redução de \$ 1.387.297,39 em comparação ao caso base.

Figura 25 - Gráfico das tensões caso 1.



Fonte: do próprio autor.

Tabela 7 - Fluxos de corrente nas linhas no caso 1.

Barra i	Barra j	I_{ij}	I_{ji}
9	8	0,348607	0,384616
7	8	0,956909	0,947436
9	6	0,891291	0,982059
7	5	1,182059	1,260772
5	4	1,038878	0,930571
6	4	0,491733	0,425645
2	7	2,133628	2,133629
3	9	1,232534	1,232534
1	4	1,33987	1,33987

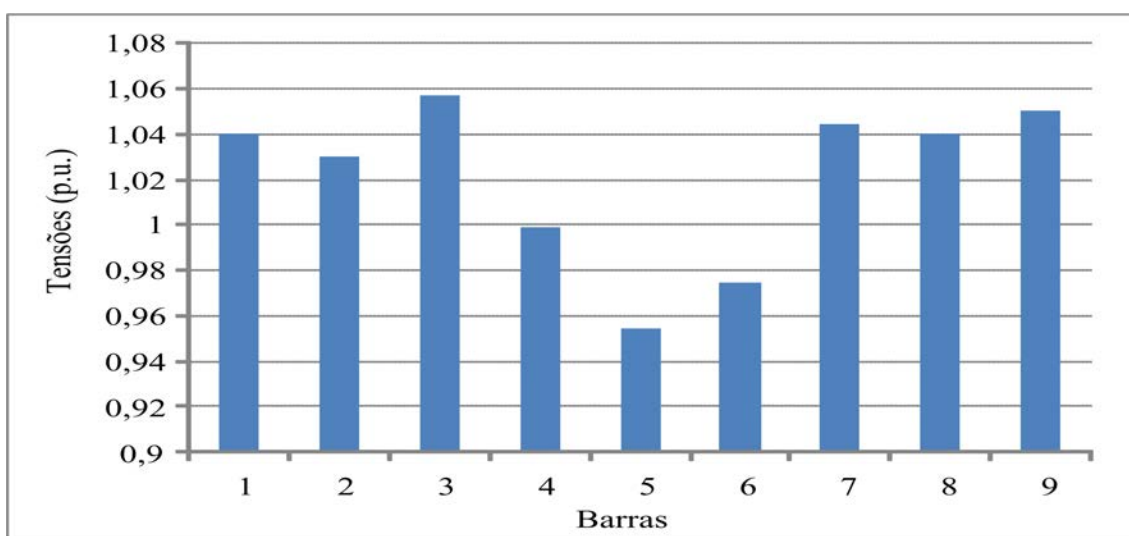
Fonte: do próprio autor.

Caso 2

Neste caso a meta-heurística alocou três equipamentos:

- Um SVC na barra 7 com $X = 0,5$.
- Um SVC na barra 8 com $X = 0,5$.
- Um TCSC no circuito 5 com $X = -0,3$.

A função objetivo foi de \$ 60.140.485,15, o que significa uma redução de \$ 1.387.297,39 em comparação ao caso base. O algoritmo encontrou a mesma solução para o sistema de 9 barras com penalidades e sem penalidades.

Figura 26 - Gráfico das tensões caso 2.

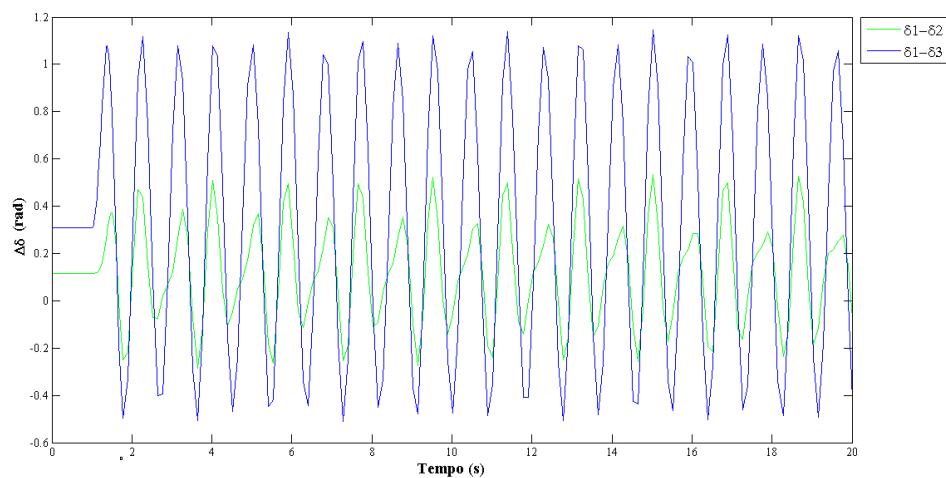
Fonte: do próprio autor.

Tabela 8 - Fluxos de corrente nas linhas no caso 2.

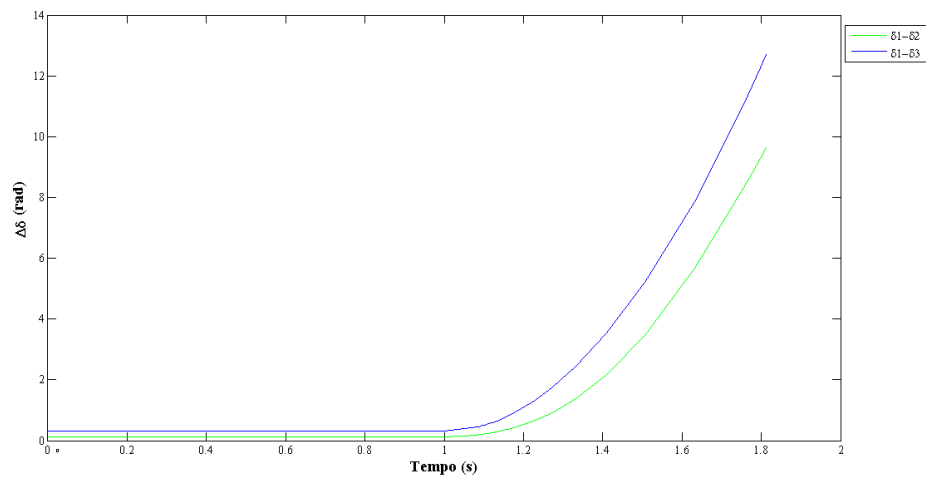
Barra i	Barra j	I_{ij}	I_{ji}
9	8	0,348607	0,384616
7	8	0,956909	0,947436
9	6	0,891291	0,982059
7	5	1,182059	1,260772
5	4	1,038878	0,930571
6	4	0,491733	0,425645
2	7	2,133628	2,133629
3	9	1,232534	1,232534
1	4	1,33987	1,33987

Fonte: do próprio autor.

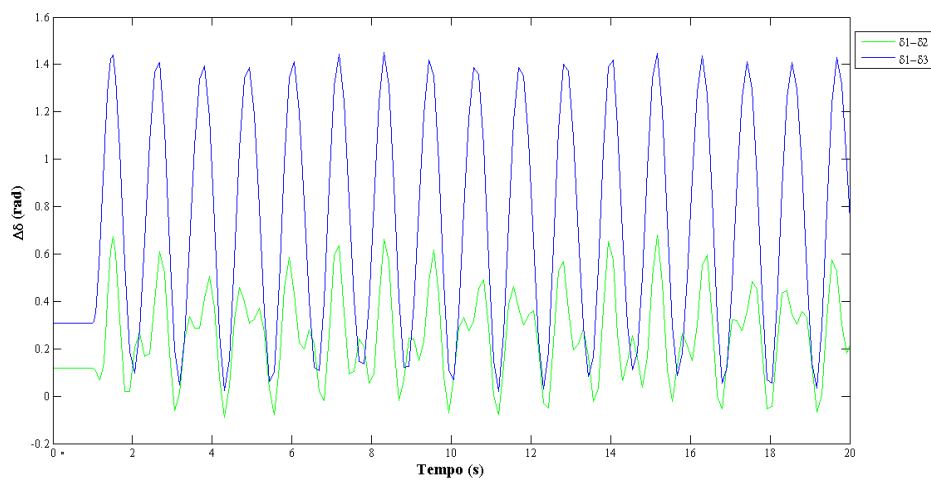
A diferença dos ângulos já com os equipamentos instalados no sistemas são apresentadas nas Figuras 27, 28, 29 e 30, para cada falta. Pode-se ver que o sistema que antes era somente estável na primeira falta, manteve a estabilidade em 3 das 4 faltas testadas.

Figura 27 - Falta # 1, sistema de 9 barras: Barra 5, Linha 5.

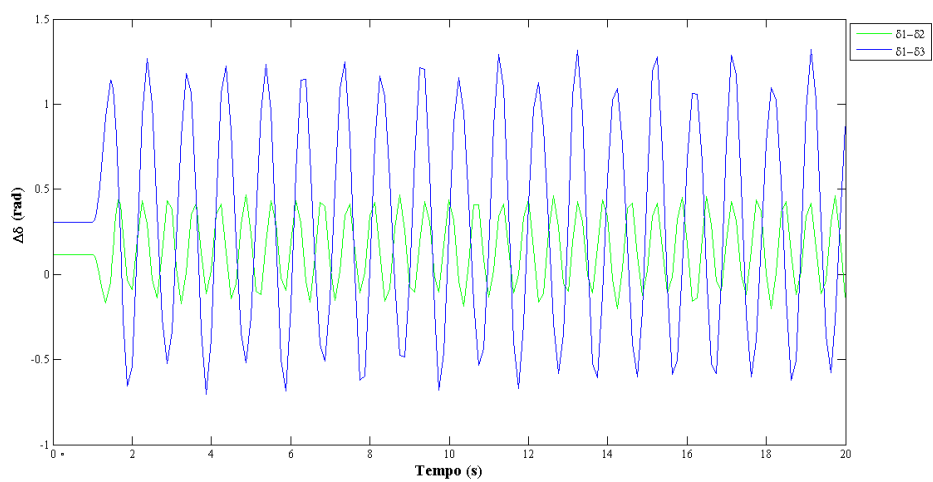
Fonte: do próprio autor.

Figura 28 - Falta # 2, sistema de 9 barras: Barra 7, Linha 4.

Fonte: do próprio autor.

Figura 29 - Falta # 3, sistema de 9 barras: Barra 4, Linha 5.

Fonte: do próprio autor.

Figura 30 - Falta # 4, sistema de 9 barras: Barra 6, Linha 3.

Fonte: do próprio autor.

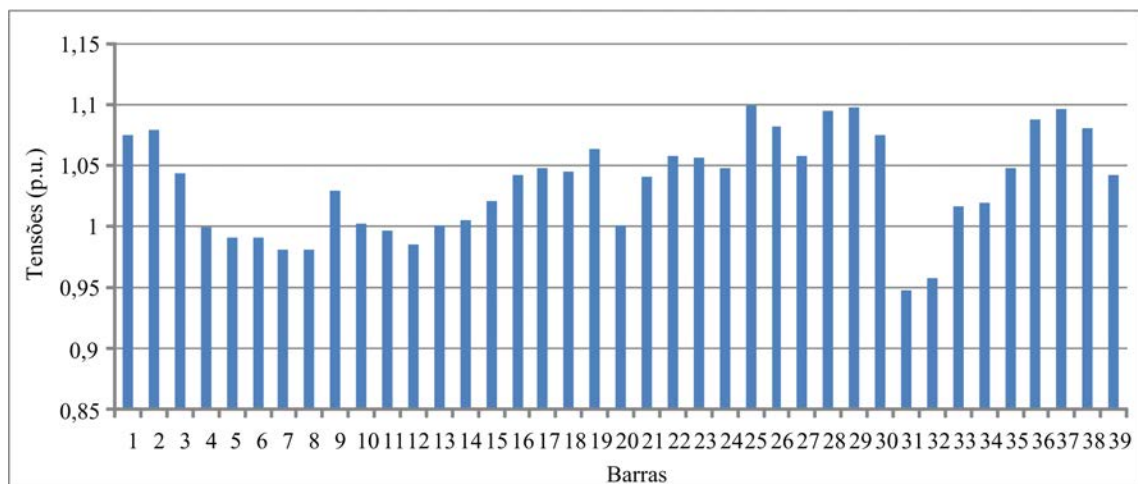
Caso 3

Neste caso a meta-heurística alocou dois equipamentos:

- Um SVC na barra 25 com $X = 0,5$.
- Um TCSC no circuito 14 com $X = -0,5$.

A função objetivo foi de \$ 186.429.645,15, o que significa uma redução de \$224.298,98 em comparação ao caso base. Na Figura 31 são apresentadas em p.u. as tensões em cada barra do sistema. Comparando com o perfil de tensões do caso base mostrado na Figura 19, o perfil de tensões no caso 3 piora levemente mas, as tensões são sempre mantidas dentro dos níveis permitidos.

Figura 31 - Gráfico das tensões no caso 3.



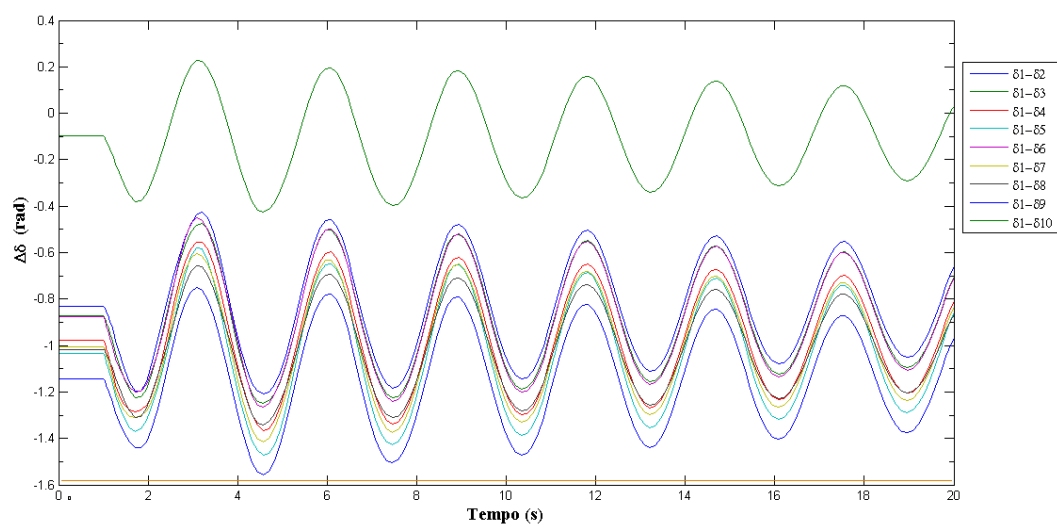
Fonte: do próprio autor.

Das cinco faltas testadas o sistema com o SVC instalado na barra 25, manteve-se estável apenas na falta 1 como se mostra na Figura 32.

Tabela 9 - Fluxos de corrente nas linhas no caso 3.

Barra i	Barra j	I_{ij}	I_{ji}
1	2	0,642303	0,548884
1	39	0,643149	0,960023
2	3	6,222076	6,301669
2	25	2,191881	2,154494
3	4	2,286243	2,480676
3	18	1,355578	1,327752
4	5	1,83751	1,89316
4	14	2,085231	2,060678
5	6	4,996959	4,99882
5	8	3,345111	3,371623
6	7	4,964314	4,983025
6	11	3,142259	3,121861
7	8	1,062613	1,045163
8	9	2,00717	1,759251
9	39	1,759871	1,391227
10	11	3,234034	3,252265
10	13	3,337125	3,331769
13	14	3,373632	3,337626
14	15	1,585702	1,379999
15	16	2,865222	2,734767
16	17	1,025727	0,932601
16	19	4,140842	4,081185
16	21	2,273092	2,303092
16	24	1,07106	1,000364
17	18	0,27934	0,395459
17	27	0,968402	0,714728
21	22	5,439963	5,395579
22	23	0,830822	0,835646
23	24	2,815978	2,824279
25	26	2,575696	2,63249
26	27	3,681314	3,771821
26	28	1,414678	1,319303
26	29	1,846954	1,783142
28	29	3,171281	3,175561
2	30	4,386128	4,495782
6	31	3,380538	3,617176
6	31	3,380538	3,617176
10	32	6,483422	6,937261
12	11	0,397099	0,399481
12	13	0,497289	0,500273
19	20	1,885909	1,999064
19	33	5,961583	6,378894
20	34	5,348584	5,396721
22	35	6,202094	6,357146
23	36	5,309098	5,309098
25	37	6,719829	6,887825
29	38	7,489995	7,677245

Fonte: do próprio autor.

Figura 32 - Falta # 1, sistema New England: Barra 15, Linha 20.

Fonte: do próprio autor.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões e os trabalhos que poderão ser desenvolvidos a partir desta pesquisa.

5.1 CONCLUSÕES

- Pode-se ver dos resultados que o algoritmo encontra soluções que reduzem o custo total de geração e justificam o custo de investimento. Isto significa que o objetivo fundamental da pesquisa é cumprido.
- A meta-heurística encontra soluções com mais equipamentos quando se diminui o valor dos equipamentos dentro da função objetivo. O valor fixado para os dispositivos foi baseado em uma fórmula encontrada nas referências. Esta fórmula do cálculo do preço do dispositivo é de um fabricante específico. Os resultados do algoritmo serão diferentes se forem adotadas outras formas de fixar o preço dos equipamentos.
- A meta-heurística desenvolvida, inspirada no GRASP, resultou muito apropriada para esta pesquisa já que do OPF obtém indicadores que podem ser utilizados para a escolha do melhor vizinho.
- O fato de que o OPF não admite dispositivos dinâmicos faz do ajuste local um processo muito importante, mas, é sempre uma parametrização discreta que pode não permitir encontrar o ponto ótimo.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

- Criar a lista RCL do algoritmo com base nos índices de sensibilidade entregues pelo OPF e descartar da lista aqueles circuitos com impedância baixa.
- Linearizar o problema de alocação ótima de equipamentos FACTS e assim obter a solução ótima global do problema.
- Desenvolver o algoritmo para outros tipos de FACTS.

- Realizar um estudo para quantificar economicamente o valor do incremento na estabilidade e assim ter um comparativo real contra o custo de instalação.
- Modificar o PSAT para que o OPF suporte dispositivos dinâmicos e assim poder executar os testes sem a necessidade de modelar o dispositivo como uma estática.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, P.; FOUAD, A. A. *Power system control and stability*. [S.l.]: JOHN WILEY & SONS, 2003. 688 p.

DAHEJ, A. E.; ESMAEILI, S.; GOROOHI, A. Optimal allocation of svc and tcsc for improving voltage stability and reducing power system losses using hybrid binary genetic algorithm and particle swarm optimization. *Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering*, Winnipeg, v. 3, n. 3, p. 100–107, March 2012.

DURAIRAJ, S.; FOX, B. Optimal placement of facts devices. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY AND ENVIRONMENT, 3., 2008, Cambridge. *Anais...* Cambridge: University of Cambridge, 2008. p. 407-411.

FARIAS, C. M. de. **Alocação ótima de equipamentos FACTS em sistemas de potencia através de algoritmos genéticos multiobjetivo**. 2010. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina-UFS, Santa Catarina, 2010.

GITIZADEH, M.; KALANTAR, M. Optimum allocation of facts devices in fars regional electric network using genetic algorithm based goal attainment. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, Tehran, v. 10, n. 4, p. 478–487, 2009.

HINGORANI, N.; GYUGYI, L. *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible ac transmission systems*. [S.l.]: Wiley-IEEE, 2000. 452 p.

HUANG, G.; LI, Y. Impact of thyristor controlled series capacitor on bulk power system reliability. In: POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 2002, Chicago. *Anais...* Nova York: IEEE, 2002. v. 2, p. 975-980.

ILIC, M.; XIE, L.; LIU, Q. *Engineering it-enabled sustainable electricity services: the tale of two low-cost green azores islands*. [S.l.]: Springer, 2013. 562 p.

JANKE, A.; MOUATT, J.; SHARP, R.; BILODEAU, H.; NILSSON, B.; HALONEN, M.; BOSTROM, A. Svc operation reliability experiences. In: POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 2010, Minneapolis. *Anais...* Nova York: IEEE, 2010. p. 1–8.

MELO, J. P. de; LIMA, F. G. de M. *Controle de fluxo de potencia usando dispositivos FACTS e meta-heurísticas*. [S.l.]: UFMS, 2009. p. 1-15. Disponível em: <<http://www.propp.ufms.br/gestor/titan.php?target=openFile&fileId=597>>. Acesso em: 1 feb 2013.

MILANO, F. An open source power system analysis toolbox. *IEEE Transactions on Power Systems*, Nova York, v. 20, n. 3, p. 1199-1206, 2005.

MILANO, F. *Power system analysis toolbox*. [S.l.: s.n.], 2007. 469 p. Disponível em: <<http://faraday1.ucd.ie/psat.html>>. Acesso em: 1 mar 2013.

MILANO, F. *Dr. Federico Milano webpage*. [S.l.: s.n.], 2013. Disponível em: <<http://faraday1.ucd.ie/psat.html>>. Acesso em: 1 nov 2013.

PASCHOARELI, D. *Introdução aos sistemas flexíveis e controladores FACTS*. Ilha Solteira: FEIS-UNESP, 2007. 20 p. Apostila do Professor.

- RADU, D.; BESANGER, Y. A multi-objective genetic algorithm approach to optimal allocation of multi-type facts devices for power systems security. In: POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, 2006, Montreal. *Anais...* New York: IEEE, 2006. p. 1-8
- RAMASUBRAMANIAN, P.; PRASANA, G.; SUMATHI, K. Optimal location of facts devices by evolutionary programming based opf in deregulated power systems. *British Journal of Mathematics and Computer Science*, Londres, v. 2, n. 1, p. 21–30, 2012.
- RAVI, K.; RAJARAM, M.; EDWARD, J. B. Hybrid particle swarm optimization technique for optimal location of facts devices using optimal power flow. *European Journal of Scientific Research*, Ponta Delgada, v. 53, n. 1, p. 142–153, 2011.
- ROMERO, R.; LAVORATO, M. Introdução a meta-heurística aplicadas a sistemas elétricos de potência. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 2012, Goiânia. *Anais...* Goiânia: SBSE, 2012. p. 1-52.
- ROMERO, R.; MANTOVANI, J. Introdução a metaheurísticas. In: CONGRESSO TEMÁTICO DE DINÂMICA E CONTROLE- SBMAC, 3., 2004, Ilha Solteira. *Anais...* Ilha Solteira: Tec Art Editora, 2004. p. 1-12.
- SONG, Y. H.; JONHS, A. T. *Flexible ac transmission systems- FACTS*. London: The Institution of Electrical Engineers, 1999. 592 p.
- SUTHA, S.; KAMARAJ, N. Optimal location of multi type facts devices for multiple contingencies using particle swarm optimization. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, New Delhi, v. 3, n. 13, p. 815–821, 2008.
- TABATABAEI, N.; AGHAJANI, G.; BOUSHEHRI, N.; SHOARINEJAD, S. Optimal location of facts devices using adaptive particle swarm optimization mixed with simulated annealing. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, Bakú, v. 3, n. 2, p. 60–70, 2011.
- TAHER, S.; BESHARAT, H. Transmission congestion management by determining optimal location of facts devices in deregulated power systems. *American Journal of Applied Sciences*, Irão, v. 5, n. 3, p. 242–247, 2008.
- TINNEY, W. F.; HART, C. Power flow solution by newton's method. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Nova York, IEEE, v. 1, n. 11, p. 1449–1460. 1967.
- VIJAYAKUMAR, K.; KUMUDINIDEVI, R. P. A new method for optimal location of facts controllers using genetic algorithm. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, Paquistão, v. 3, n. 4, p. 1-6, 2007.
- VIVAS, J. H.; SOLARI, G. P.; FIGUEROA, G. A. Localización óptima de dispositivos facts en sistemas de transmisión usando enjambre de partículas. In: CONGRESO VENEZOLANO EN REDES Y ENERGÍA ELÉCTRICA, 1., 2007, Caracas. *Anais*, Caracas: Universidad Simon Bolivar, 2007. p. 1-8
- VOLPI, N. M. P.; ALMEIDA, K. C. de. Algoritmo genético multicritério para alocação de dispositivos de controle em uma rede de transmissão elétrica. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO- ENEGEP, 28., 2008, Rio de Janeiro. *Anais*, Rio de Janeiro: Abepro, 2008. p. 1-14.

ANEXO A

Neste anexo mostram-se o formato no qual devem-se ordenar os dados de um determinado sistema para executar as rotinas no PSAT.

Tabela 10 - Formato de dados das barras.

Columna	Variável	Descrição	Grandeza
1	-	Número de Barra	int
2	Vb	Tensão Base	kV
* 3	V0	Amplitude da primeira tensão estimada	p.u.
* 4	q0	Fase da primeira tensão estimada	rad
* 5	Ai	Número de Area (não utilizado)	int
* 6	Ri	Numero de Região (não utilizado)	int

* Este campo é opcional

Fonte: Milano (2007).

Tabela 11 - Formato de dados das linhas.

Columna	Variável	Descrição	Grandeza
1	k	Barra Inicial	int
2	m	Barra Final	int
3	Sn	Potência Nominal	MVA
4	Vn	Tensão Nominal	kV
5	fn	Frequência Nominal	Hz
6	l	Comprimento da Linha	km
7	-	não utilizado	-
8	r	Resistência	p.u. (Ω/km)
9	x	Reatância	p.u. (H/km)
10	b	Susceptância	p.u. (F/km)
*11	-	não utilizado	-
*12	-	não utilizado	-
*13	Imax	Limite de Corrente	p.u.
*14	Pmax	Limite de Potência Ativa	p.u.
*15	Smax	Limite de Potência Aparente	p.u.
*16	u	Estado de Conexão	{0, 1}

* Este campo é opcional

Fonte: Milano (2007).

Tabela 12 - Formato de dados da barra de referencia.

Columna	Variável	Descrição	Grandeza
1	-	Número de Barra	int
2	Sn	Potência Nominal	MVA
3	Vn	Tensão Nominal	kV
4	V0	Magnitude de Tensão	p.u.
5	q0	Ângulo de Referência	p.u.
*6	Qmax	Maximo de Potência Reativa	p.u.
*7	Qmin	Mínimo de Potência Reativa	p.u.
*8	Vmax	Maximo de Tensão	p.u.
*9	Vmin	Mínimo de Tensão	p.u.
*10	P0	Potência Ativa Estimada	p.u.
*11	g	Coefficiente de Participação de Perda	-

* Este campo é opcional

Fonte: Milano (2007).

Tabela 13 - Formato de dados dos transformadores.

Columna	Variável	Descrição	Grandeza
1	k	Barra Inicial	int
2	m	Barra Final	int
3	Sn	Potência Nominal	MVA
4	Vn	Tensão Nominal	kV
5	fn	Frequência Nominal	Hz
6	-	não utilizado	-
7	KT	Tensão nominal no primario e secundário	kV/kV
8	r	Resistência	p.u. (Ω/km)
9	x	Reatância	p.u. (H/km)
10	-	não utilizado	-
*11	a	Relação de Tap Fixa	p.u/p.u.
*12	f	Defasamento Fixo	deg
*13	Imax	Limite de Corrente	p.u.
*14	Pmax	Limite de Potência Ativa	p.u.
*15	Smax	Limite de Potência Aparente	p.u.
*16	u	Estado de Conexão	0,1

* Este campo é opcional

Fonte: Milano (2007).

Tabela 14 - Formato de dados das barras PV.

Columna	Variável	Descrição	Grandeza
1	-	Número de Barra	int
2	Sn	Potência Nominal	MVA
3	Vn	Tensão Nominal	kV
4	Pg	Potência Ativa	p.u.
5	V0	Magnitude de Tensão	p.u.
*6	Qmax	Potência Reativa Máxima	p.u.
*7	Qmin	Potência Reativa Mínima	p.u.
*8	Vmax	Tensão Máxima	p.u.
*9	Vmin	Tensão Mínima	p.u.
*10	g	Coefficiente de Participação de Perda	-
*11	u	Estado de Conexão	0,1

* Este campo é opcional

Fonte: Milano (2007).

Tabela 15 - Formato de dados das barras PQ.

Columna	Variável	Descrição	Grandeza
1	-	Número de Bus	int
2	Sn	Potência Nominal	MVA
3	Vn	Tensão Nominal	kV
4	PL	Potência Ativa	p.u.
5	QL	Potência Reativa	p.u.
*6	Vmax	Tensão Máxima	p.u.
*7	Vmin	Tensão Mínima	p.u.
*8	z	Permitir conversão de impedância	0,1
*9	u	Estado de Conexão	0,1

* Este campo é opcional

Fonte: Milano (2007).

Tabela 16 - Formato de dados das cargas em derivação (*shunt*).

Columna	Variável	Descrição	Grandeza
1	-	Número de Bus	int
2	Sn	Potência Nominal	MVA
3	Vn	Tensão Nominal	kV
4	fn	Frequência Nominal	Hz
5	g	Condutância	p.u.
*6	b	Suceptância	p.u.
*7	u	Estado de Conexão	0,1

* Este campo é opcional

Fonte: Milano (2007).

Tabela 17 - Formato de dados da oferta.

Columna	Variável	Descrição	Grandeza
1	-	Número de Barra	int
2	Sn	Potência Nominal	MVA
*3	Ps0	Direção da Potência Reativa	p.u.
4	PSmax	Potência Máxima Proposta	p.u.
5	PSmin	Potência Mínima Proposta	p.u.
** 6	PS*	Atual Potência Ativa Proposta	p.u.
7	CP0	Custo Proporcional (Potência Ativa)	\$/h
8	CP1	Custo Fixo (Potência Ativa)	\$/MWh
9	CP2	Custo Quadrático (Potência Ativa)	\$/MW2h
10	CQ0	Custo Proporcional (Potência Reativa)	\$/h
11	CQ1	Custo Fixo (Potência Reativa)	\$/MVarh
12	CQ2	Custo Quadrático (Potência Reativa)	\$/MVar2h
13	u	Variável de Compromiso	boolean
14	kTB	Custo de Ruptura Gravata	\$/MWh
15	g	Fator de Participação de Perdida	-
16	Qgmax	Potência Reativa Máxima	p.u.
17	Qgmin	Potência Reativa Mínima	p.u.
18	CupS	Custo de Congestionamento Alto	\$/h
19	CdwS	Custo de Congestionamento Bajo	\$/h
20	u	Estado de Conexão	0,1

Fonte: Milano (2007).

Tabela 18 - Formato de dados da demanda.

Columna	Variável	Descrição	Grandeza
1	-	Número de Barra	int
2	Sn	Potência Nominal	MVA
*3	PD0	Direção da Potência Ativa	p.u.
*4	QD0	Direção da Potência Reativa	p.u.
5	PDmax	Potência Máxima Proposta	p.u.
6	PDmin	Potência Mínima Proposta	p.u.
** 7	PD*	Atual Potência Ativa Proposta	p.u.
8	CP0	Custo Proporcional (Potência Ativa)	\$/h
9	CP1	Custo Fixo (Potência Ativa)	\$/MWh
10	CP2	Custo Quadrático (Potência Ativa)	\$/MW2h
11	CQ0	Custo Proporcional (Potência Reativa)	\$/h
12	CQ1	Custo Fixo (Potência Reativa)	\$/MVarh
13	CQ2	Custo Quadrático (Potência Reativa)	\$/MVar2h
14	u	Variável de Compromiso	boolean
15	kTB	Custo de Ruptura Gravata	\$/MWh
16	CupS	Custo de Congestionamento Alto	\$/h
17	CdwS	Custo de Congestionamento Bajo	\$/h
18	u	Estado de Conexão	0,1

Fonte: Milano (2007).

Tabela 19 - Formato de dados das faltas.

Columna	Variável	Descrição	Grandeza
1	-	Número de Barra	int
2	Sn	Potência Nominal	MVA
3	Vn	Tensão Nominal	kV
4	fn	Frequência Nominal	Hz
5	tf	Tempo de Falha	s
6	tc	Tempo de Despeje	s
7	rf	Resistência de Falha	p.u.
8	xf	Reactância de Falha	p.u.

Fonte: Milano (2007).

Tabela 20 - Formato de dados das chaves (*breakers*).

Columna	Variável	Descrição	Grandeza
1	-	Número de Linha	int
2	-	Número de Barra	int
3	Sn	Potência Nominal	MVA
4	Vn	Tensão Nominal	kV
5	fn	Frequência Nominal	Hz
6	u	Estado de Conexão	0,1
7	t1	Tempo da Segunda Intervenção	s
8	t2	Tempo da Primeira Intervenção	s

Fonte: Milano (2007).

Tabela 21 - Formato de dados do SVC.

Columna	Variável	Descrição	Grandeza
1	-	Número de Barra	int
2	Sn	Potência Nominal	MVA
3	Vn	Tensão Nominal	kV
4	fn	Frequência Nominal	Hz
5	1	Tipo de Modelo	int
6	Tr	Constante de Tempo do Regulador	s
7	Kr	Ganho do Regulador	p.u./p.u.
8	Vref	Tensão de Referência	p.u.
9	bmax	Suceptância Máxima	p.u.
10	bmin	Suceptância Mínima	p.u.
17	u	Estado de Conexão	0,1

Fonte: Milano (2007).

Tabela 22 - Formato de dados do TCSC.

Columna	Variável	Descrição		Grandeza	
1	i	Número de Linha		int	
2	-	Tipo de Modelo	1	Reatância xC	int
			2	Ângulo de Disparo α	
3	-	Modo de Operação	1	Constante xC	int
			2	Constante Pkm	
4	-	Estratégia Agendada	1	Constante Pkm	int
			2	Constante qkm	
5	Sn	Potência Nominal			MVA
6	Vn	Tensão Nominal			kV
7	fn	Frequência Nominal			Hz
8	Cp	Porcentagem da compensação serie			%
9	Tr	Constante de Tempo do Regulador			s
10	$x_{Cmax}(\alpha_{max})$	Reatância Máxima (Ângulo de Disparo)			rad
11	$x_{Cmin}(\alpha_{min})$	Reatância Mínima (Ângulo de Disparo)			rad
12	KP	Ganho Proporcional do Controlador PI			p.u./p.u.
13	KI	Ganho Integral do Controlador PI			p.u./p.u.
14	xL	Reatância (Indutiva)			p.u.
15	xC	Reatância (Capacitiva)			p.u.
16	Kr	Ganho da sinal estabilizada			p.u./p.u.
17	u	Estado de Conexão			0,1

Fonte: Milano (2007).

Tabela 23 - Formato de dados da máquina síncrona.

Columna	Variável	Descrição	Grandeza	Modelo
1	-	Número de Barra	int	all
2	Sn	Potência Nominal	MVA	all
3	Vn	Tensão Nominal	kV	all
4	fn	Frequência Nominal	Hz	all
5	-	Modelo de Máquina	-	all
6	xl	Reatância de Fuga	p.u.	all
7	ra	Resistência de Armadura	p.u.	all
8	xd	d-axis reactância síncrona	p.u.	III, IV, V.1, V.2, V.3, VI, VIII
9	x'd	d-axis reactância transitória	p.u.	II, III, IV, V.1, V.2, V.3, VI, VIII
10	x''d	d-axis reactância subtransitória	p.u.	V.2, VI, VIII
11	T'd0	d-axis constante de tempo de transitório de circuito aberto	s	III, IV, V.1, V.2, V.3, VI, VIII
12	T''d0	d-axis constante de tempo de subtransitório de circuito aberto	s	V.2, VI, VIII
13	xq	q-axis reactância síncrona	p.u.	III, IV, V.1, V.2, V.3, VI, VIII
14	x'q	q-axis reactância transitória	p.u.	IV, V.1, VI, VIII
15	x''q	q-axis reactância subtransitória	p.u.	V.2, VI, VIII
16	T'q0	q-axis constante de tempo de transitório de circuito aberto	s	IV, V.1, VI, VIII
17	T''q0	q-axis constante de tempo de subtransitório de circuito aberto	s	V.1, V.2, VI, VIII
18	M=2H	Tempo de Início Mecânico (2 vezes constante de inercia)	kWs/kVA	all
19	D	Coeficiente de Amortecimento	-	all
*20	Kw	Rapidez de ganho de retroalimentação	ganho	III, IV, V.1, V.2, VI
*21	KP	Ganho de retroalimentação de Potência Ativa	ganho	III, IV, V.1, V.2, VI
*22	gP	Potência Ativa Nominal ao Nó	[0,1]	all
*23	gQ	Potência Reativa Nominal ao Nó	[0,1]	all
*24	TAA	d-axis constante de Tempo de fuga adicional	s	V.2, VI, VIII
*25	S(1.0)	Primeiro Fator de Saturação	-	III, IV, V.1, V.2, VI, VIII
*26	S(1.2)	Segundo Fator de Saturação	-	III, IV, V.1, V.2, VI, VIII

*Campos opcionais

Fonte: Milano (2007).

ANEXO B

Neste anexo são apresentadas as rotinas utilizadas durante a pesquisa. Mostram-se os modelos matemáticos usados na ferramenta escolhida, o PSAT.

B.1 FLUXO DE POTÊNCIA (PF)

Como foi mencionado, o fluxo de potência representa o núcleo do software e é responsável pela inicialização das variáveis estáticas. No toolbox, métodos como o padrão Newton-Raphson e o fluxo de potência desacoplado rápido (XB e BX), foram implementados (MILANO, 2007).

O fluxo de potência é representado como as soluções de um sistema algébrico de equações não lineares da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \dot{x} = 0 &= f(x, y) \\ 0 &= g(x, y) \end{aligned} \tag{14}$$

Onde y ($y \in R^{2n}$), sendo n o número de barras da rede, as variáveis algébricas, em outras palavras, a amplitude de tensão V e o ângulo θ de cada barra, x ($x \in R^{2n}$) são as variáveis de estado, g ($g \in R^{2n}$) são as equações algébricas do balanço de potências ativa e reativa em cada barra e f ($f \in R^{2n}$) são as equações diferenciais. Outras variáveis estáticas e dinâmicas dentro do PSAT são inicializadas depois de resolver o fluxo de potência.

Para esta pesquisa a rotina do fluxo de potência utilizou o método de Newton-Raphson, explicado a seguir.

B.1.1 Newton Raphson

O método de Newton Raphson, explicado amplamente em Tinney e Hart (1967), atualiza em cada iteração a matriz jacobiana do problema linear mostrado em (15):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta x^i \\ \Delta y^i \end{bmatrix} &= - \begin{bmatrix} F_x^i & -F_y^i \\ G_x^i & J_{LFV}^i \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f^i \\ g^i \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x^{i+1} \\ y^{i+1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x^i \\ y^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x^i \\ \Delta y^i \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{15}$$

se os incrementos nas variáveis Δ_x e Δ_y forem menores em módulo que uma tolerância especificada ε ou o número de iterações for maior que um limite definido ($i > i_{max}$) as iterações são interrompidas. A matriz jacobiana do fluxo de potência ($J_{LFV} = \Delta_y g$) de tal maneira que ($J_{LFV} \in R^{2n \times 2n}$) siga:

- A coluna das derivadas em relação ao ângulo de referência é definido como 0.
- As colunas das derivadas em relação às tensões dos geradores são definidos como 0.
- As linhas das derivadas dos balanços de potência ativa e potência reativa da barra de referência são definidas como 0.
- Os elementos diagonais das interseções dos elementos descritos são definidos como 1.
- Os elementos do vetor g associados com as potências reativas do gerador e a potência ativa da barra de referência são definidas como 0

Estas suposições são equivalentes às equações em (16):

$$\begin{aligned}\theta_{ref} &= \theta_{ref_0} \\ V_G &= V_{G_0}\end{aligned}\tag{16}$$

onde θ_{ref} é o ângulo da tensão da barra de referencia e V_g o vetor de tensões dos geradores. A matriz jacobiana possui grande dimensão o que não resulta em um esforço computacionalmente devido às propriedades do MATLAB na solução de matrizes dispersas (MILANO, 2007).

B.2 FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO (OPF)

Esta rotina é resolvida usando o método de pontos interiores e o método *predictor-corrector*. Das três opções de função objetivo, disponibilizadas pelo toolbox, nesta pesquisa utiliza-se somente o máximo benefício social como objetivo do OPF.

B.2.1 Máximo Benefício Social

A abordagem baseada em um fluxo de potência ótimo é, basicamente, um problema de otimização não linear com uma função objetivo escalar e com restrições de igualdade e desigualdade. (17) mostra o modelo que representa o problema da maximização do benefício social, (MILANO, 2007).

$$\begin{aligned}
\text{Min } z &= -(\sum C_{Di}(P_{Di}) - \sum C_{Si}(P_{Si})) \rightarrow \text{Benefício Social} \\
&\text{s.a} \\
g(\delta, V, Q_G, P_S, P_D) &= 0 \rightarrow \text{Equações do Fluxo de Potência} \\
0 \leq P_S &\leq P_{S_{max}} \rightarrow \text{Oferta da Geração} \\
0 \leq P_D &\leq P_{D_{max}} \rightarrow \text{Oferta da Demanda} \\
|P_{ij}(\delta, V)| &\leq P_{ij_{max}} \rightarrow \text{Máxima Transf de Potência} \\
|P_{ji}(\delta, V)| &\leq P_{ji_{max}} \\
Q_{G_{min}} \leq Q_G &\leq Q_{G_{max}} \rightarrow \text{Lim de Geração de Q} \\
V_{min} \leq V &\leq V_{max} \rightarrow \text{Segurança de V}
\end{aligned} \tag{17}$$

onde C_S e C_D são os vetores das ofertas de geração e demanda em \$/MWh, respectivamente. Q_G é a potência reativa dos geradores, V e δ representam as tensões e ângulos nas barras, P_{ij} e P_{ji} representam o fluxo de potência nas linhas em ambos sentidos, P_S e P_D representam os limites das ofertas de geração e demanda em MW.

É importante destacar que PSAT é o único *MATLAB-based* software que fornece um algoritmo de método de pontos interiores para resolver o fluxo ótimo de potência no problema de equilíbrio do mercado (MILANO, 2006).

B.3 FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO (CPF)

A função CPF inclusa no PSAT é considerada uma novidade dentro dos *MATLAB-based* softwares de análise de sistemas de energia elétrica. O algoritmo do CPF consiste em um passo preditor que calcula o vetor tangente normalizado e um passo corretor que é obtido mediante uma parametrização local ou uma interseção perpendicular. Baseado em (14) o problema do CPF é definido em (18) (MILANO, 2006).

$$\begin{aligned}
0 &= f(x, y, \lambda) \\
0 &= g(x, y, \lambda)
\end{aligned} \tag{18}$$

onde $\lambda \in R$ é o índice de carregamento, que é usado para variar o caso base do gerador e as potências de carga, P_{G_0} , P_{L_0} e Q_{L_0} e respetivamente, como mostrado em (19) (MILANO, 2006).

$$\begin{aligned}
P_G &= (\lambda + \gamma\kappa_G) P_{G_0} \\
[P_L, Q_L] &= \lambda [P_{L_0}, Q_{L_0}]
\end{aligned} \tag{19}$$

B.4 ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO (TD)

Dois métodos de integração estão disponíveis no software para a solução de análises no domínio do tempo: i.e. forward Euler e a integração por regra trapezoidal. Ambos utilizam a matriz jacobiana para avaliar as direções, em cada passo, das variáveis algébricas e de estado do sistema (MILANO, 2007).

Para um tempo t , e assumindo um passo do tamanho Δt , deve ser resolvido o problema mostrado em (20):

$$\begin{aligned} 0 &= f_n(x(t + \Delta t), y(x(t + \Delta t)), f(t)) \\ 0 &= g(x(t + \Delta t), y(x(t + \Delta t))) \end{aligned} \quad (20)$$

onde f e g representam as equações algébricas e diferenciais e f_n é uma função dependente do método de integração. As equações (20) são não lineares e são resolvidas por Newton-Raphson, esta técnica calcula iterativamente os incrementos δx^i e δy^i das variáveis algébricas e de estado e atualizando-as como mostrado em (21).

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta x^i \\ \Delta y^i \end{bmatrix} &= -[A_c^i]^{-1} \begin{bmatrix} f_n^i \\ g^i \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x^{i+1} \\ y^{i+1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x^i \\ y^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x^i \\ \Delta y^i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

onde A_c^i é uma matriz que depende das matrizes jacobianas algébricas e de estado do sistema. O processo iterativo termina quando o incremento das variáveis for menor que uma tolerância especificada ε_0 ou quando o máximo de iterações for atingido. Se o máximo de iterações foi atingido então o Δt é reduzido e a técnica de Newton-Raphson se repete. A figura 33 apresenta o diagrama de blocos da integração no domínio do tempo. Para este trabalho foi sempre utilizado o método trapezoidal de integração.

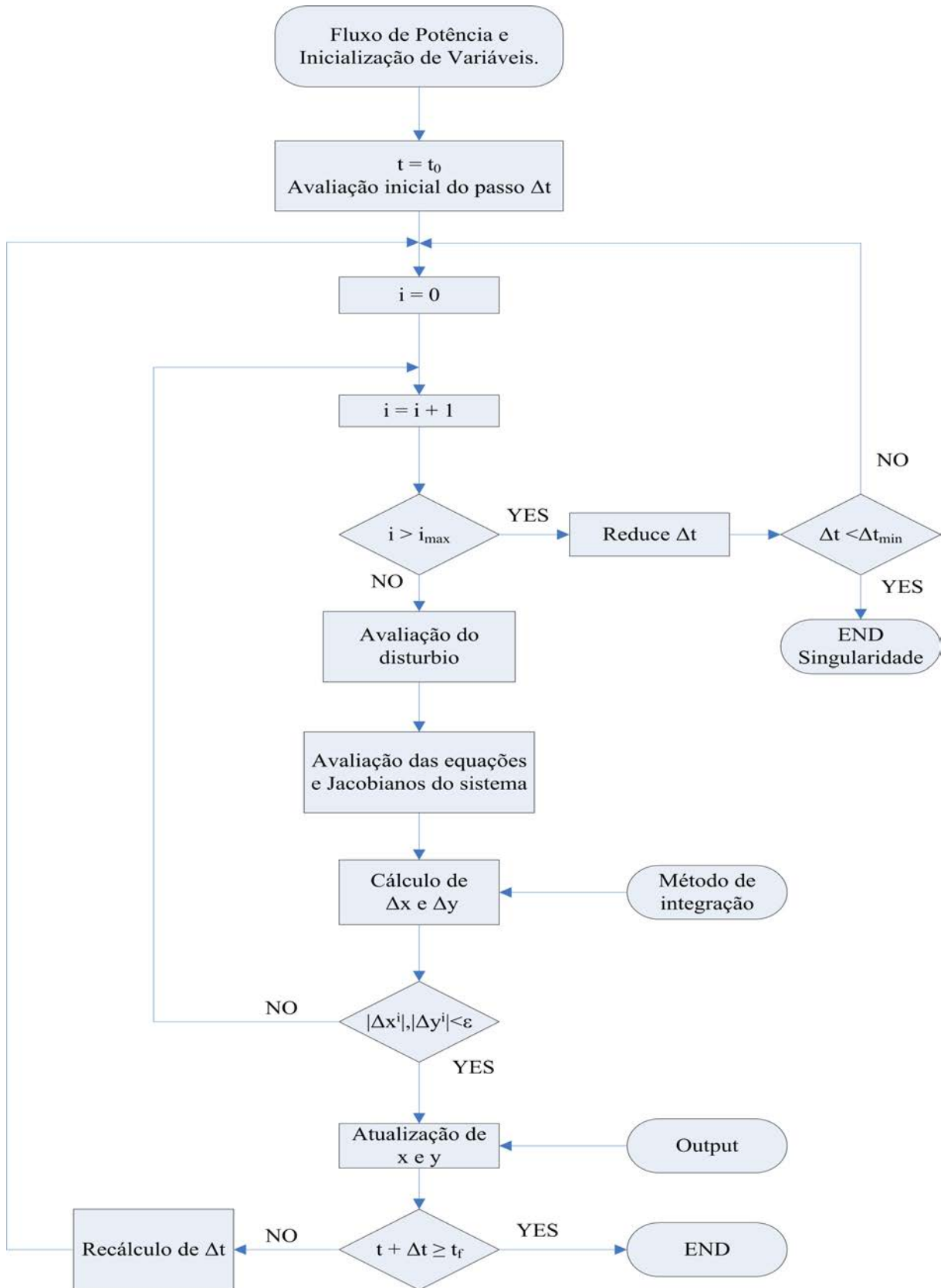
B.4.1 Método Trapezoidal

O método trapezoidal é o cavalo de batalha ou *workhorse* dos *solvers* de equações diferenciais algébricas eletromecânicas. Este método é muito utilizado em softwares comerciais e não comerciais de sistemas de potência, (MILANO, 2007). Em uma iteração i , (22) mostra A_c^i e f_n^i .

$$A_c^i = \begin{bmatrix} I_n - 0.5\Delta t F_x^i & -0.5\Delta t F_y^i \\ G_x^i & J_{LFV}^i \end{bmatrix}$$

$$f_n^i = x^i - x(t) - 0.5\Delta t (f^i + f(t))$$

onde I_n é uma matriz identidade do mesmo tamanho que a ordem dinâmica do sistema, e as outras matrizes são as jacobianas das equações diferenciais algébricas.

Figura 33 - Diagrama de blocos da análise no domínio do tempo.

Fonte: (MILANO, 2007).

ANEXO C

Neste anexo apresentam-se os dados do sistema teste New England de 39 barras, no formato exigido pelo PSAT. Estes dados são propriamente o arquivo .m inserido no toolbox de acordo com a ordem apresentada nas tabelas do Anexo A.

Bus.con = [...

1 100.00 1.04810 -0.16458 1 2;
2 100.00 1.05050 -0.12025 1 2;
3 100.00 1.03410 -0.16982 1 2;
4 100.00 1.01160 -0.18378 1 1;
5 100.00 1.01650 -0.16371 1 1;
6 100.00 1.01730 -0.15149 1 1;
7 100.00 1.00670 -0.18919 1 1;
8 100.00 1.00570 -0.19792 1 1;
9 100.00 1.03220 -0.19460 1 1;
10 100.00 1.02350 -0.11013 1 1;
11 100.00 1.02010 -0.12427 1 1;
12 100.00 1.00720 -0.12444 1 1;
13 100.00 1.02070 -0.12252 1 1;
14 100.00 1.01810 -0.15115 1 1;
15 100.00 1.01940 -0.15813 1 3;
16 100.00 1.03460 -0.13369 1 3;
17 100.00 1.03650 -0.15097 1 2;
18 100.00 1.03430 -0.16563 1 2;
19 100.00 1.05090 -0.05306 1 3;
20 100.00 0.99140 -0.07767 1 3;

21 100.00 1.03370 -0.09180 1 3;
22 100.00 1.05090 -0.01431 1 3;
23 100.00 1.04590 -0.01780 1 3;
24 100.00 1.03990 -0.13160 1 3;
25 100.00 1.05870 -0.09617 1 2;
26 100.00 1.05360 -0.11816 1 2;
27 100.00 1.03990 -0.15324 1 2;
28 100.00 1.05090 -0.05707 1 3;
29 100.00 1.05050 -0.00890 1 3;
30 100.00 1.04750 -0.07802 1 2;
31 100.00 0.98200 0.00000 1 1;
32 100.00 0.98310 0.02845 1 1;
33 100.00 0.99720 0.03805 1 3;
34 100.00 1.01230 0.01292 1 3;
35 100.00 1.04930 0.07226 1 3;
36 100.00 1.06350 0.11921 1 3;
37 100.00 1.02780 0.02217 1 2;
38 100.00 1.02650 0.11432 1 3;
39 100.00 1.03000 -0.19129 1 1;

];

PV.con = [...

30 100.0 100.00 2.50000 1.04750 99.99000 -99.99000 1.1 0.9 1 1;
32 100.0 100.00 6.50000 0.98310 99.99000 -99.99000 1.1 0.9 1 1;
33 100.0 100.00 6.32000 0.99720 99.99000 -99.99000 1.1 0.9 1 1;
34 100.0 100.00 5.08000 1.01230 99.99000 -99.99000 1.1 0.9 1 1;
35 100.0 100.00 6.50000 1.04930 99.99000 -99.99000 1.1 0.9 1 1;

36 100.0 100.00 5.60000 1.06350 99.99000 -99.99000 1.1 0.9 1 1;
37 100.0 100.00 5.40000 1.02780 99.99000 -99.99000 1.1 0.9 1 1;
38 100.0 100.00 8.30000 1.02650 99.99000 -99.99000 1.1 0.9 1 1;
39 100.0 100.00 10.00000 1.03000 99.99000 -99.99000 1.1 0.9 1 1;
];

PQ.con = [...

3 100.0 100.00 3.22000 0.02400 1.1 0.9 1 1;
4 100.0 100.00 5.00000 1.84000 1.1 0.9 1 1;
7 100.0 100.00 2.33800 0.84000 1.1 0.9 1 1;
8 100.0 100.00 5.22000 1.76000 1.1 0.9 1 1;
12 100.0 100.00 0.08500 0.88000 1.1 0.9 1 1;
15 100.0 100.00 3.20000 1.53000 1.1 0.9 1 1;
16 100.0 100.00 3.29400 0.32300 1.1 0.9 1 1;
18 100.0 100.00 1.58000 0.30000 1.1 0.9 1 1;
20 100.0 100.00 6.80000 1.03000 1.1 0.9 1 1;
21 100.0 100.00 2.74000 1.15000 1.1 0.9 1 1;
23 100.0 100.00 2.47500 0.84600 1.1 0.9 1 1;
24 100.0 100.00 3.08600 -0.92200 1.1 0.9 1 1;
25 100.0 100.00 2.24000 0.47200 1.1 0.9 1 1;
26 100.0 100.00 1.39000 0.17000 1.1 0.9 1 1;
27 100.0 100.00 2.81000 0.75500 1.1 0.9 1 1;
28 100.0 100.00 2.06000 0.27600 1.1 0.9 1 1;
29 100.0 100.00 2.83500 0.26900 1.1 0.9 1 1;
31 100.0 100.00 0.09200 0.04600 1.1 0.9 1 1;
39 100.0 100.00 11.04000 2.50000 1.1 0.9 1 1;
];

Line.con = [...

1 2 100.00 100.00 60 0 0 0.00350 0.04110 0.69870 0.00000 0.00000 0 8.000 0.000 1;
1 39 100.00 100.00 60 0 0 0.00200 0.05000 0.37500 0.00000 0.00000 0 5.000 0.000 1;
2 3 100.00 100.00 60 0 0 0.00130 0.01510 0.25720 0.00000 0.00000 0 5.000 0.000 1;
2 25 100.00 100.00 60 0 0 0.00700 0.00860 0.14600 0.00000 0.00000 0 8.000 0.000 1;
3 4 100.00 100.00 60 0 0 0.00130 0.02130 0.22140 0.00000 0.00000 0 5.000 0.000 1;
3 18 100.00 100.00 60 0 0 0.00110 0.01330 0.21380 0.00000 0.00000 0 5.000 0.000 1;
4 5 100.00 100.00 60 0 0 0.00080 0.01280 0.13420 0.00000 0.00000 0 5.000 0.000 1;
4 14 100.00 100.00 60 0 0 0.00080 0.01290 0.13820 0.00000 0.00000 0 5.000 0.000 1;
5 6 100.00 100.00 60 0 0 0.00020 0.00260 0.04340 0.00000 0.00000 0 5.000 0.000 1;
5 8 100.00 100.00 60 0 0 0.00080 0.01120 0.14760 0.00000 0.00000 0 8.000 0.000 1;
6 7 100.00 100.00 60 0 0 0.00060 0.00920 0.11300 0.00000 0.00000 0 8.000 0.000 1;
6 11 100.00 100.00 60 0 0 0.00070 0.00820 0.13890 0.00000 0.00000 0 8.000 0.000 1;
7 8 100.00 100.00 60 0 0 0.00040 0.00460 0.07800 0.00000 0.00000 0 8.000 0.000 1;
8 9 100.00 100.00 60 0 0 0.00230 0.03630 0.38040 0.00000 0.00000 0 8.000 0.000 1;
9 39 100.00 100.00 60 0 0 0.00100 0.02500 1.20000 0.00000 0.00000 0 8.000 0.000 1;
10 11 100.00 100.00 60 0 0 0.00040 0.00430 0.07290 0.00000 0.00000 0 8.000 0.000 1;
10 13 100.00 100.00 60 0 0 0.00040 0.00430 0.07290 0.00000 0.00000 0 8.000 0.000 1;
13 14 100.00 100.00 60 0 0 0.00090 0.01010 0.17230 0.00000 0.00000 0 8.000 0.000 1;
14 15 100.00 100.00 60 0 0 0.00180 0.02170 0.36600 0.00000 0.00000 0 8.000 0.000 1;
15 16 100.00 100.00 60 0 0 0.00090 0.00940 0.17100 0.00000 0.00000 0 8.000 0.000 1;
16 17 100.00 100.00 60 0 0 0.00070 0.00890 0.13420 0.00000 0.00000 0 8.000 0.000 1;
16 19 100.00 100.00 60 0 0 0.00160 0.01950 0.30400 0.00000 0.00000 0 8.000 0.000 1;
16 21 100.00 100.00 60 0 0 0.00080 0.01350 0.25480 0.00000 0.00000 0 8.000 0.000 1;
16 24 100.00 100.00 60 0 0 0.00030 0.00590 0.06800 0.00000 0.00000 0 8.000 0.000 1;
17 18 100.00 100.00 60 0 0 0.00070 0.00820 0.13190 0.00000 0.00000 0 8.000 0.000 1;

17 27 100.00 100.00 60 0 0 0.00130 0.01730 0.32160 0.00000 0.00000 0 8.000 0.000 1;
21 22 100.00 100.00 60 0 0 0.00080 0.01400 0.25650 0.00000 0.00000 0 10.000 0.000 1;
22 23 100.00 100.00 60 0 0 0.00060 0.00960 0.18460 0.00000 0.00000 0 10.000 0.000 1;
23 24 100.00 100.00 60 0 0 0.00220 0.03500 0.36100 0.00000 0.00000 0 10.000 0.000 1;
25 26 100.00 100.00 60 0 0 0.00320 0.03230 0.51300 0.00000 0.00000 0 10.000 0.000 1;
26 27 100.00 100.00 60 0 0 0.00140 0.01470 0.23960 0.00000 0.00000 0 10.000 0.000 1;
26 28 100.00 100.00 60 0 0 0.00430 0.04740 0.78020 0.00000 0.00000 0 10.000 0.000 1;
26 29 100.00 100.00 60 0 0 0.00570 0.06250 1.02900 0.00000 0.00000 0 10.000 0.000 1;
28 29 100.00 100.00 60 0 0 0.00140 0.01510 0.24900 0.00000 0.00000 0 10.000 0.000 1;
2 30 100.00 100.00 60 0 0 0.00000 0.01810 0.00000 1.02500 0.00000 0 15.000 0.000 1;
6 31 100.00 100.00 60 0 0 0.00000 0.05000 0.00000 1.07000 0.00000 0 15.000 0.000 1;
6 31 100.00 100.00 60 0 0 0.00000 0.05000 0.00000 1.07000 0.00000 0 15.000 0.000 1;
10 32 100.00 100.00 60 0 0 0.00000 0.02000 0.00000 1.07000 0.00000 0 15.000 0.000 1;
12 11 100.00 100.00 60 0 0 0.00160 0.04350 0.00000 1.00600 0.00000 0 15.000 0.000 1;
12 13 100.00 100.00 60 0 0 0.00160 0.04350 0.00000 1.00600 0.00000 0 15.000 0.000 1;
19 20 100.00 100.00 60 0 0 0.00070 0.01380 0.00000 1.06000 0.00000 0 15.000 0.000 1;
19 33 100.00 100.00 60 0 0 0.00070 0.01420 0.00000 1.07000 0.00000 0 15.000 0.000 1;
20 34 100.00 100.00 60 0 0 0.00090 0.01800 0.00000 1.00900 0.00000 0 15.000 0.000 1;
22 35 100.00 100.00 60 0 0 0.00000 0.01430 0.00000 1.02500 0.00000 0 15.000 0.000 1;
23 36 100.00 100.00 60 0 0 0.00050 0.02720 0.00000 1.00000 0.00000 0 15.000 0.000 1;
25 37 100.00 100.00 60 0 0 0.00060 0.02320 0.00000 1.02500 0.00000 0 15.000 0.000 1;
29 38 100.00 100.00 60 0 0 0.00080 0.01560 0.00000 1.02500 0.00000 0 20.000 0.000 1;
];

Syn.con = [...

39 100.0 100.0 60 3 0.0030 0.00010 0.0200 0.0060 0.0006 7 0.033 0.019 0.008 0.0006 0.7 0.0563 1000.0 10.000 0.00 0 1 1 0.002 0 0 1 1;

31 100.0 100.0 60 4 0.035 0.00270 0.2950 0.0697 0 6.560 0 0.2820 0.1700 0 1.500 0 60.600 9.750 0.00 0 1 1 0.002 0 0 1 1;

32 100.0 100.0 60 4 0.0304 0.00030 0.2495 0.0531 0 5.700 0 0.2370 0.0876 0 1.500 0 71.600 10.000 0.00 0 1 1 0.002 0 0 1 1;

33 100.0 100.0 60 4 0.0295 0.00030 0.2620 0.0436 0 5.690 0 0.2580 0.1660 0 1.500 0 57.200 10.000 0.00 0 1 1 0.002 0 0 1 1;

34 100.0 100.0 60 4 0.0540 0.00030 0.6700 0.1320 0 5.400 0 0.6200 0.1660 0 0.440 0 52.000 3.000 0.00 0 1 1 0.002 0 0 1 1;

35 100.0 100.0 60 4 0.0224 0.00030 0.2540 0.0500 0 7.300 0 0.2410 0.0814 0 0.400 0 69.600 10.000 0.00 0 1 1 0.002 0 0 1 1;

36 100.0 100.0 60 4 0.0322 0.00030 0.2950 0.0490 0 5.660 0 0.2920 0.1860 0 1.500 0 52.800 8.000 0.00 0 1 1 0.002 0 0 1 1;

37 100.0 100.0 60 4 0.0280 0.00030 0.2900 0.0570 0 6.700 0 0.2800 0.0911 0 0.410 0 48.600 9.000 0.00 0 1 1 0.002 0 0 1 1;

38 100.0 100.0 60 4 0.0298 0.00020 0.2106 0.0570 0 4.790 0 0.2050 0.0587 0 1.960 0 69.000 14.000 0.00 0 1 1 0.002 0 0 1 1;

30 100.0 100.0 60 4 0.0125 0.00070 0.1000 0.0310 0 10.20 0 0.0690 0.0080 0 0.500 0 84.000 4.000 0.00 0 1 1 0.002 0 0 1 1;

];

Tg.con = [...

1 1 1 0.20 12 3 0.1 0.45 0.00 12.0 50.0 1;
2 1 1 0.30 16.24 1.56 0.1 0.45 0.00 12.0 50.0 1;
3 1 1 0.30 7.8 1.95 0.1 0.45 0.00 12.0 50.0 1;
4 1 1 0.25 7.56 1.9 0.1 0.45 0.00 12.0 50.0 1;
5 1 1 0.20 6.12 1.53 0.1 0.45 0.00 12.0 50.0 1;
6 1 1 0.24 8.12 2.03 0.1 0.45 0.00 12.0 50.0 1;
7 1 1 0.24 6.72 1.68 0.1 0.45 0.00 12.0 50.0 1;
8 1 1 0.26 6.5 1.63 0.1 0.45 0.00 12.0 50.0 1;
9 1 1 0.35 9.98 2.5 0.1 0.45 0.00 12.0 50.0 1;
10 1 1 0.22 3 0.75 0.1 0.45 0.00 12.0 50.0 1;
];

Exc.con = [...

2 2 1 -1 6.20 0.050 0.057 0.500 -0.6330 0.405 0.002 0.37125 0.2842 1;
3 2 1 -1 5.00 0.060 0.08 1.000 -0.0198 0.500 0.002 0.0073 1.2314 1;
4 2 1 -1 5.00 0.060 0.08 1.000 -0.0525 0.500 0.002 0.0013 1.5725 1;
5 2 10 -10 40.00 0.020 0.03 1.000 1 0.785 0.002 0.000032 1.9596 1;
6 2 1 -1 5.00 0.020 0.0754 1.246 -0.0419 0.471 0.002 0.00106 1.1430 1;
7 2 6.5 -6.5 40.00 0.020 0.03 1.000 1 0.730 0.002 0.19472 0.3574 1;
8 2 1 -1 5.00 0.020 0.0854 1.260 -0.0470 0.528 0.002 0.0012 1.2833 1;
9 2 10.5 -10.5 40.00 0.020 0.03 1.000 1 1.400 0.002 0.2406 0.2224 1;
10 2 1 -1 5.00 0.060 0.04 1.000 -0.0485 0.250 0.002 0.0023 0.9971 1;
];

Regions.con = [...

1 39 100.0 0.00000 0.00010 0 0 0;
2 37 100.0 0.00000 0.00010 0 0 0;

```
3 36 100.0 0.00000 0.00010 0 0 0;  
  
];  
  
Bus.names = { ...  
'BUS01'; 'BUS02'; 'BUS03'; 'BUS04'; 'BUS05';  
'BUS06'; 'BUS07'; 'BUS08'; 'BUS09'; 'BUS10';  
'BUS11'; 'BUS12'; 'BUS13'; 'BUS14'; 'BUS15';  
'BUS16'; 'BUS17'; 'BUS18'; 'BUS19'; 'BUS20';  
'BUS21'; 'BUS22'; 'BUS23'; 'BUS24'; 'BUS25';  
'BUS26'; 'BUS27'; 'BUS28'; 'BUS29'; 'BUS30';  
'BUS31'; 'BUS32'; 'BUS33'; 'BUS34'; 'BUS35';  
'BUS36'; 'BUS37'; 'BUS38'; 'BUS39'  
  
};  
  
Regions.names = { ...  
'0SY';  
'0SY';  
'0SY'};
```