

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

EDIVAN QUEIROZ PEREIRA REGIS

**ALOCÇÃO E AJUSTE ÓTIMO DE DISPOSITIVOS D-FACTS EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO ALGORITMO GENÉTICO**

Ilha Solteira
2022

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

EDIVAN QUEIROZ PEREIRA REGIS

**ALOCÇÃO E AJUSTE ÓTIMO DE DISPOSITIVOS D-FACTS EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO ALGORITMO GENÉTICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista - UNESP, Câmpus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automação

Prof. Dr. Jonatas Boas Leite
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

R337a Regis, Edivan Queiroz Pereira.
Alocação e ajuste ótimo de dispositivos D-FACTS em sistemas de distribuição de energia elétrica usando algoritmo genético / Edivan Queiroz Pereira Regis. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
71 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2022

Orientador: Jonas Boas Leite
Inclui bibliografia

1. FACTS. 2. D-FACTS. 3. Fluxo de potência ótimo. 4. Redes inteligentes. 5. Algoritmo meta-heurístico.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

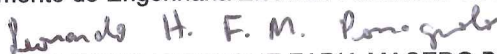
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Alocação e Ajuste Ótimo de Dispositivos D-FACTS em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica usando Algoritmo Genético

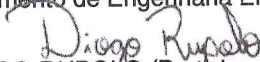
AUTOR: EDIVAN QUEIROZ PEREIRA REGIS

ORIENTADOR: JONATAS BOAS LEITE

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:


Dr. JONATAS BOAS LEITE (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. LEONARDO HENRIQUE FARIA MACEDO POSSAGNOLO (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Dr. DIOGO RUPOLO (Participação Virtual)
Centro de Ciência e Tecnologia / Universidade Presbiteriana Mackenzie

Ilha Solteira, 09 de setembro de 2022

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos que estiveram me apoiando ao longo desta jornada, me dando forças, confiança e auxílio. Em especial dedico aos meus pais Raimundo e Terezinha (*in memorian*), que para mim foram verdadeiros heróis no mais amplo sentido e a minha irmã Isabel (Bel) (*in memorian*) que nos deixou durante essa jornada do mestrado.

Aos meus amigo(a)s pelos incentivos à busca de novos conhecimentos, a todos os professores que muito contribuíram no meu processo de aprendizagem.

À minha família, exemplo de força e dedicação, base da minha vida e educação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus pela saúde e tudo de bom que ele tem feito; aos meus pais, Raimundo e Terezinha (*in memorian*); a minha irmã Isabel (Bel) (*in memorian*); ao Prof. Dr. Jonas Boas Leite, pela confiança em concretização desse trabalho e pela grande paciência e compreensão durante sua realização.

À minha prima Vania Pereira de Souza, por sempre acreditar em meu potencial, e nunca deixou de falar para mim que eu conseguiria.

Agadeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-Brasil (CAPES) pelo apoio financeiro (Código de Financiamento 001”).

*“se você quiser descobrir os segredos do universo,
pense em termos de energia, frequência e vibração”.*
Nikola Tesla

RESUMO

Nos sistemas elétricos de transmissão e distribuição, parte significativa das preocupações se concentram em manter o sistema operando dentro de seus limites operacionais com a mínima perda possível. Com tal enfoque, muitos equipamentos eletroeletrônicos, têm sido usados. Reguladores de tensão, bancos de capacitores e, mais recentemente, os dispositivos FACTS (*Flexible Alternative Current Transmission Systems*), também chamados de D-FACTS (*Distributed-FACTS*), quando aplicados em sistemas de distribuição de energia elétrica. Com os D-FACTS é possível obter uma regulação mais precisa dos limites operacionais do sistema elétrico, pois o ajuste de seus parâmetros é contínuo e realizado de forma automática. Neste trabalho, propõe-se realizar a alocação e ajustes ótimos dos dispositivos com conversores eletrônicos capazes de fazer a compensação série, como o DSSC (*Distributed Static Series Compensator*), DVR (*Dynamic Voltage Restorer*) em sistemas de distribuição por meio da solução de um problema de fluxo de potência ótimo. A solução desse problema pode ser alternativamente obtida usando algoritmos metaheurísticos devido sua eficácia em problemas dessa natureza. Em particular, aplica-se o algoritmo genético, em que, sua performance é avaliada por meio dos sistemas testes de 17, 33 e 135 barras.

Palavras-chaves: FACTS; D-FACTS; Fluxo de Potência Ótimo; Redes inteligentes; Algoritmo Meta-heurístico

ABSTRACT

In electrical transmission and distribution systems, a significant part of the concerns are focused on keeping the system operating within its operational limits with the least possible loss. With such an approach, many electrical and electronic equipment have been used. Voltage regulators, capacitor banks and, more recently, FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) devices, also called D-FACTS (Distributed-FACTS) when applied in electric power distribution systems. With FACTS it is possible to obtain a more precise regulation of the operational limits of the electrical system, since the adjustment of its parameters is continuous and carried out automatically. In this special study, it is proposed to carry out the optimal allocation and adjustment of devices with electronic converters capable of performing series compensation, such as DSSC (Distributed Static Series Compensator), DVR (Dynamic Voltage Restorer) in distribution systems through the solution of a optimal power flow problem. The solution to this problem can alternatively be obtained using metaheuristic algorithms due to their effectiveness in problems of this nature. In particular, genetic algorithm is applied in which its performance is evaluated through the test systems of 17, 33 and 135 nodes.

Keywords: FACTS; D-FACTS; Optimal Power Flow; Smart Grid; Metaheuristic Algorithm

Lista de figuras

Figura 01: Compensador estático de reativos.....	21
Figura 02: Curva V-I do SVC.....	21
Figura 03: Esquema básico do STATCOM.....	22
Figura 04: Comparação entre as curvas V-I do SVC e STATCOM.....	23
Figura 05: Diagrama simplificado do UPFC.....	24
Figura 06: Esquema básico do SSSC.....	25
Figura 07: D-FACTS ao longo da linha de distribuição.....	27
Figura 08 : Esquema básico do DRV.....	28
Figura 09: Esquema básico do DSSC.....	29
Figura 10: Parte de uma rede de distribuição radial.....	32
Figura 11: Fluxograma do algoritmo de cálculo do fluxo de potência pelo MSP.....	34
Figura 12: Trecho de um alimentador radial com SSSC.....	37
Figura 13: Fluxograma de funcionamento do algoritmo genético usado	42
Figura 14: Processo de cruzamento e mutação do cromossomo.....	48
Figura 15 : Topologia do sistema teste de 135 barras radial para aplicações do MSP.....	49
Figura 16: Perfis de tensão para o sistema teste na fase a.....	50
Figura 17: Comparação entre os ângulos das tensões nodais trifásicas.....	51
Figura 18: Combinações possíveis dos parâmetros.....	54
Figura 19: Comportamento da demanda requerida pelo sistema em 24 horas.....	55
Figura 20: <i>Fitness</i> gerados pelas combinações dos parâmetros do AG no sistema de 17 barras (1 FACTS).....	58
Figura 21: Comportamento do <i>fitness</i> nos ciclos geracionais para 17 barras (1 FACTS).....	59
Figura 22 - <i>Fitness</i> gerados pelas combinações dos parâmetros do AG no sistema de 33 barras (1 FACTS).....	60

Figura 23: Comportamento do <i>fitness</i> nos ciclos geracionais para 33 barras (1 FACTS).....	60
Figura 24 - <i>Fitness</i> gerados pelas combinações dos parâmetros do AG no sistema de 135 barras (1 FACTS).....	61
Figura 25: Comportamento do <i>fitness</i> nos ciclos geracionais para 135 barras (1 FACTS).....	62
Figura 26: <i>Fitness</i> gerados pelas combinações dos parâmetros do AG no sistema de 135 barras (2 FACTS).....	63
Figura 27: Comportamento do <i>fitness</i> nos ciclos geracionais para 135 barras (2 FACTS).....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Representação dos cromossos do AG.....	45
Tabela 02: Desempenho do MSP trifásico.....	52
Tabela 03: Limites operacionais.....	53
Tabela 04: Formato de codificação do cromossomo AG.....	54
Tabela 05: Valores dos parâmetros do SSSC... ..	56
Tabela 06: Valores mínimos e máximos das magnitudes das tensões.....	56
Tabela 07: Custos totais e das perdas ativas para o sistema de teste.....	57
Tabela 08: Perdas ativas totais (kw).....	57
Tabela 09: Parâmetros do AG para os casos do <i>boxplot</i> 15 e 16.... ..	59
Tabela 10: Parâmetros do AG para as instâncias melhor_09 e _14..... ..	61
Tabela 11: Parâmetros do AG para as instâncias melhor_13 e 15..... ..	62
Tabela 12: Parâmetros do AG para as instâncias melhor_14 e _16.....	64

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

FACTS:	<i>Flexible Alternating Current Transmission</i>
STATCOM:	<i>Static Synchronous Compensator</i>
SVC:	<i>Static VAR Compensator</i>
TCSC:	<i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
UPFC:	<i>Unified Power Flow Controller</i>
SSSC:	<i>Static Synchronous Series Compensator</i>
D-FACTS:	<i>Distributed Flexible AC Transmission System</i>
DSSC:	<i>Distributed Static Series Compensator</i>
DVR:	<i>Dynamic Voltage Restorer</i>
MSP:	Método da Soma das Potências
ANEEL:	Agência Nacional de Energia Elétrica
PTS:	<i>Parallel Tabu Search</i>
AGMO:	Algoritmo Genético Multiobjetivo
SEP:	Sistema Elétrico de Potência
FPO:	Fluxo de Potência ótimo
IEEE:	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
OLCT:	<i>On-load tap changer</i>
PVS:	Penetração de Energia Fotovoltaica
GD:	Geração Distribuída
IPFC:	<i>Interline Power Flow Controller</i>
TCR:	<i>Thyristor-controlled Reactor</i>
TSC:	<i>Thyristor-switched capacitor</i>
VTCD:	Variação de Tensão de Curta Duração
AG:	Algoritmo Genético
C#:	Linguagem de programação C sharp

Sumário

Sumário	12
1. INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
1.2 ESTADO DA ARTE	15
1.2.1 Dispositivos FACTS/D-FACTS Aplicados ao Sistema de Potência.....	18
1.2.2 Dispositivos FACTS	19
1.2.2.1 Compensador Estático de Reativos.....	20
1.2.2.2 Compensador Estático Síncrono.....	22
1.2.2.3 Compensador Unificado de Fluxo de Potência	23
1.2.2.4 Compensador Estático Síncrono Série	24
1.2.3 Dispositivos FACTS Distribuídos (D-FACTS)	26
1.2.3.1 Restaurador de Tensão Dinâmico	27
1.2.3.2 Compensador Série Estático Distribuído	28
1.3 ESTRUTURA DO TEXTO	30
2. FLUXO DE POTÊNCIA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	31
2.1 MÉTODO DA SOMA DE POTÊNCIAS CONVENCIONAL	31
2.2 BREVE DISCUSSÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO PARA SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	34
2.3 MSP COM FORMULAÇÃO TRIFÁSICA.....	35
2.4 INCLUSÃO DO SSSC NO MÉTODO DA SOMA DAS POTÊNCIAS.....	37
2.5 MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA ALOCAÇÃO DO SSSC	39
3. ALGORITMO GENÉTICO	41
3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	41
3.2 ESTRUTURAÇÃO DO ALGORITMO PARA O PROBLEMA.....	42
3.2.1 Função de Aptidão.....	43
3.2.1.1 Método da Função de Penalidade	43
3.2.2 Processo de Codificação	44
3.2.3 População Inicial.....	46
3.2.4 Método de Seleção	46
3.2.5 Cruzamento (Recombinação).....	47
3.2.6 Mutação	47
4. ANÁLISE DE RESULTADOS	49

4.1 FLUXO DE POTÊNCIA: SISTEMA TESTE DE 135 BARRAS	49
4.1.1 Caso I: Fluxo Monofásico e Trifásico	50
4.1.2 Caso II: Carga Desbalanceada	51
4.2.1 Curva de Operação da Demanda do Sistema	55
4.2.2 Análise da Alocação e Ajuste do SSSC	56
4.2.3 Análise do Algoritmo Genético	58
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	65
BIBLIOGRAFIA	66

1. INTRODUÇÃO

O sistema de energia elétrica consiste em três partes: sistema de geração; transmissão e distribuição. As usinas elétricas estão situadas mais próximas aos reservatórios da fonte primária de energia. Normalmente, as cargas elétricas estão distantes das unidades geradoras. As linhas de transmissão transferem energia da unidade geradora para o centro de carga. A transmissão ocorre no nível de Alta Tensão ou de Extra Alta Tensão (LODDI, 2010).

Com o rápido aumento da industrialização e urbanização, a demanda de energia elétrica cresce continuamente. Isto causa maior estresse no sistema existente. Assim, os sistemas de energia elétrica são interconectados por meio de linhas de transmissão para formar a rede elétrica. A rede de energia elétrica ajuda a aumentar a diversidade de cargas, compartilhando os recursos disponíveis e operando economicamente as unidades geradoras. Também melhora a eficiência e a confiabilidade do sistema de energia elétrica. Um sistema de energia estável permanece em equilíbrio sob condições normais de operação e recupera o estado normal de operação após a perturbação. Dessa forma, fornece energia sem interrupções. Perturbações como falhas do sistema, adição ou remoção repentina de carga, etc, tornam o sistema instável. Há possibilidades de falta do sistema se o efeito desses distúrbios não for eliminado. A falta no sistema é indesejada e antieconômica (LODDI, 2010).

A tecnologia FACTS é utilizada para minimizar os efeitos da perturbação. Os dispositivos FACTS consistem em dispositivos eletrônicos e controladores de potência. O objetivo dos dispositivos FACTS é melhorar a estabilidade do sistema de energia através do controle dos parâmetros do sistema, tais como tensão (V), ângulo de potência (δ) e reatância série (X). Os dispositivos FACTS são classificados como:

- ✓ Dispositivos de compensação de derivação;
- ✓ Dispositivos de compensação em série;
- ✓ Dispositivos combinados.

Alguns FACTS tais como: STATCOM, SVC, TCSC e UPFC são usados para controlar potência ativa e reativa do sistema elétrico (BRIGATTO, 2010).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar os efeitos da inserção dos dispositivos D-FACTS, tais como o DSSC e DVR, na rede de distribuição de energia elétrica para a compensação série.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo principal são listados os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Estudar o equacionamento monofásico do fluxo de potência usando o método da soma de potências (MSP). Expandir o equacionamento do MSP para redes trifásicas e desbalanceadas de distribuição de energia elétrica;
- ✓ Desenvolver computacionalmente, a partir da teoria dos algoritmos de otimização, meios para realizar a alocação e ajuste ótimos dos dispositivos D-FACTS em redes de distribuição de energia elétrica, tendo como função objetivo a minimização do custo anualizado de aquisição do dispositivo mais o custo anual das perdas técnicas;
- ✓ Implementar computacionalmente um algoritmo genético como técnica de solução do problema estabelecido;
- ✓ Fazer uma análise do comportamento dos dispositivos D-FACTS na rede de distribuição de energia elétrica de modo a mostrar os benefícios resultantes da sua inserção nessa mesma rede.

1.2 ESTADO DA ARTE

No sistema de distribuição o uso dos dispositivos FACTS/D-FACTS traz alguns benefícios, entre eles a diminuição das perdas de potência, a melhoria do perfil de tensão nas barras e o aumento da capacidade do sistema. Tais êxitos advindos das alocações de D-FACTS em sistemas de distribuição depende de algumas escolhas específicas, como o local, o tipo de D-FACTS e o número de D-FACTS que serão alocados. Entende-se que há de se ter um equilíbrio entre minimizar as perdas do sistema e investir em métodos de compensação de perdas, caso contrário o investimento realizado pode acarretar em prejuízos. Sendo assim, é necessário

considerar o tempo de retorno do investimento, a fim de verificar a viabilidade da sua instalação.

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), níveis de tensão são estabelecidos e devem ser respeitados pelas concessionárias de energia elétrica com a finalidade de garantir o bom funcionamento do sistema de distribuição. Estes níveis são indicadores de qualidade e podem ser considerados "adequados", "precários" ou "críticos" (ANEEL, 2022). Tais exigências são importantes devido à necessidade da existência de métodos compensatórios adequados que tornem os sistemas de distribuição mais eficientes e que garantam que estes atenderão às legislações vigente.

Diante do exposto e respeitando as limitações do sistema de distribuição de energia elétrica, torna-se evidente que a alocação dos D-FACTS seja um ponto crucial para controle do sistema, assim como a determinação dos tipos, das quantidades e das localizações ideais dos D-FACTS no sistema de distribuição de energia elétrica. Portanto, faz-se necessário apresentar alguns trabalhos de destaque no segmento dos D-FACTS aplicados na rede de distribuição de energia elétrica, determinação do fluxo de potência no sistema de distribuição de energia elétrica e métodos de otimização aplicados ao sistema de distribuição de energia.

Em Farias (2010), é apresentada uma metodologia detalhada para resolver o problema de alocação ótima de equipamentos FACTS em sistemas de transmissão considerando otimização multiobjetivo. Dois critérios são utilizados: o técnico e o econômico. O critério econômico é expresso por meio do custo do equipamento em US\$/kVAr. Para representar o critério técnico, duas diferentes funções são consideradas: mínimo desvio quadrático das tensões em relação aos valores nominais e a máxima transferência de potência entre áreas. Um algoritmo genético multiobjetivo (AGMO) é desenvolvido para gerar o conjunto de soluções de Pareto do problema e assim garantir a otimização simultânea de ambos os critérios.

Em Mohamed, Al-Jaafary e Mohame (2021), é feito um estudo de alocações de dispositivos FACTS na rede de transmissão de energia elétrica, por meio de algoritmo genético, neste trabalho o algoritmo é usado para a alocação do dispositivo e dimensionamentos ótimos dos dispositivos alocados, com intuito de melhorar a qualidade do desempenho do sistema de energia. No trabalho em questão, o desafio consiste em considerar uma mistura de várias funções objetivo, que são considerações econômicas como minimizar o custo total de geração e o custo de

investimento dos dispositivos FACTS, além de minimizar as perdas do sistema, manter o perfil de tensão dentro de limites aceitáveis e considerar a minimização do fluxo de potência reativa no sistema elétrico.

O problema de alocação e ajuste de D-FACTS vem sendo investigado há alguns anos, mas ainda encontram-se poucos resultados na literatura. (MORI, 2001) propõe um método de alocação do dispositivo SVC (*Static Var Compensator*) para manter as tensões nodais dentro dos limites em um ambiente com geração eólica. Para tal fim, é utilizado o método de busca tabu paralela ou PTS (do inglês *Parallel Tabu Search*), desenvolvido para melhorar o desempenho da Busca Tabu.

Em Pezzini (2009), é feito o estudo da alocação ótima de dispositivos FACTS em redes de distribuição usando algoritmos genéticos para maximizar a eficiência energética do sistema.

Em Chabok e Ashouri (2016), é proposto uma combinação dos algoritmos de competição imperialista discreta e Nelder-Mead para resolver o problema de otimização de posicionamento do D-STATCOM. Os estudos de simulação foram aplicados em um sistema de distribuição radial IEEE de 30 barras.

Em Gaigowal, *et al.* (2017), o posicionamento ideal do DSSC na linha existente é implementado para minimizar a geração de potência reativa. Estudos de caso são apresentados no sistema IEEE de 14 barras e sistema TNEB de 69 barras.

No estudo de Hamidi (2019) é proposta uma abordagem multiobjetivo para programação diária de microrredes (MGs) capaz de suportar uma maior penetração de energia fotovoltaica (PVs). Nesta abordagem, os dispositivos de controle existentes, incluindo D-FACTS e comutador de *tap* sob carga (ULTC) são integrados ao processo de controle Volt/VAr. Os autores concluem que a cooperação de energia reativa dos D-STATCOMs, nivela o perfil de tensão da MG, permite moderar a operação de comutação diária do ULTC, reduz as perdas de energia dos alimentadores e desligamentos dos geradores distribuídos (GD) despacháveis em intervalos de pico e fora de pico.

Neste contexto, em Urquizo, *et al.* (2017), é feita uma análise de vários estudos de caso considerando a aplicação de dispositivos D-FACTS em microrredes. Se, por um lado, a escolha do dispositivo D-FACTS apropriado é crucial para melhorar a qualidade da energia, por outro lado, o posicionamento ideal desses dispositivos é primordial para reduzir a complexidade e o custo do sistema.

Em Gandoman, *et al.* (2018), assume-se que os D-FACTSs desempenham um papel importante na melhoria do fator de potência, melhoria da qualidade da energia e garantia de utilização eficiente de energia e gerenciamento de energia em redes inteligentes, (do Inglês, *Smart Grids*) com fontes de energia renováveis. Da análise realizada, incluem-se no escopo para pesquisas futuras: a integração eficiente de FACTS em microrredes com sistemas fotovoltaicos, células combustível e super capacitores; e o desenvolvimento de dispositivos FACTS e restauração dinâmica de tensão para a estabilização de tensão e redução de perdas, além de liberação de capacidade e regulação de tensão.

1.2.1 Dispositivos FACTS/D-FACTS Aplicados ao Sistema de Potência

Os primeiros sistemas elétricos de potência (SEPs) eram pequenos e não estavam interligados. Dessa forma, não apresentavam grande complexidade, pois possuíam poucas interconexões. Atualmente o cenário é outro e a cada dia há um aumento da demanda por eletricidade. A princípio, a construção de novas unidades geradoras poderia resolver o problema da demanda. Entretanto, os altos custos envolvidos na expansão do sistema elétrico, tais como construção de novas usinas e linhas de transmissão, e também as restrições ambientais, inviabilizam na maioria dos casos esta expansão (FORTES *et al.*, 2016)

Por outro lado, deve-se levar em consideração que o gerenciamento da energia e operação dos SEPs é uma tarefa muito difícil e complexa, exigindo um planejamento antecipado e bem executado. Tal complexidade do planejamento e operação de um SEP se deve, em grande parte, a problemas relacionados com a rede de transmissão, já que grande parte das linhas de transmissão estão sujeitas a limites térmicos ou de estabilidade, podendo ocasionar restrições no nível de potência que pode ser transmitido com segurança em determinadas linhas de transmissão. Também não pode-se desprezar nessa situação o sistema de distribuição (WATANABE *et al.*, 1998).

Diante das restrições apresentadas, foi necessário o desenvolvimento de dispositivos que pudessem controlar os fluxos de potência em determinadas linhas de um sistema elétrico. Neste contexto, e com o desenvolvimento ao longo dos anos da eletrônica de potência, novos dispositivos automáticos de compensação foram sendo incorporados aos SEPs com o objetivo de melhorar o controle e torná-los mais flexíveis e seguros.

Em especial, na transmissão de energia elétrica, se destacam os FACTS.

Esses dispositivos tornaram menos rígidos os sistemas de transmissão, permitindo aumentar a capacidade de transferência de potência nos sistemas já existentes. Dependendo do tipo de FACTS é possível o controle contínuo dos fluxos de potência (ativa e reativa) em locais específicos dos sistemas e uma melhora significativa (nas proximidades de sua instalação) dos problemas referentes aos níveis de tensão dos SEPs (VALLE; ARAÚJO, 2015). Contudo, os FACTS devem ser tratados sempre como alternativa na tentativa de se tentar suprir o aumento da demanda por energia, maximizando o potencial elétrico já instalado, controlando o fluxo de potência já existente (Gyugyi *et al.*, 1999)

É de costume classificar os FACTS em quatro gerações. Na primeira geração estão os dispositivos comutados por tiristores e podem estar tanto ligados em derivação ou em série com suas respectivas linhas de transmissão. Destacam nessa geração os FACTS como *Static Var Compensator* (SVC) (HINGORANI e GYUGYI, 1999) e o *Thyristor Controlled Series Compensador* (TCSC); Na segunda geração encontram-se os comutados por transistores que utilizam a tecnologia *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) ou *Gate Turn Off Thyristor* (GTO). Nesta geração destacam-se o *Static Synchronous Shunt Compensator* (STATCOM) (HINGORANI e GYUGYI, 1999), o qual está conectado em derivação com a rede de transmissão e o compensador série *Static Synchronous Series Compensator* (SSSC). A terceira geração é formada por FACTS que integram na mesma linha de transmissão, dispositivos série e em derivação. Nesta geração pode ser citado o *Unified Power Flow Controller* (UPFC) (HINGORANI e GYUGYI, 1999), formado a partir da combinação do SSSC e do STATCOM. Na quarta geração, encontram-se os FACTS que realizam compensação série e em derivação em linhas de transmissão distintas. Nesta categoria está o *Interline Power Flow Controller* (IPFC) (Gyugyi *et al.*, 1999), que pode ser representado a partir da combinação de dois ou mais SSSCs e o *Generalized Power Flow Controller* (GUPFC) (VALLE e ARAUJO, 2015), representado a partir da combinação de um IPFC com um STATCOM.

1.2.2 Dispositivos FACTS

Alguns FACTS, tais como: SVC, STATCOM, TCSC e UPFC são usados para controlar potências ativa e reativa do sistema elétrico (BRIGATTO, 2010). Nesse

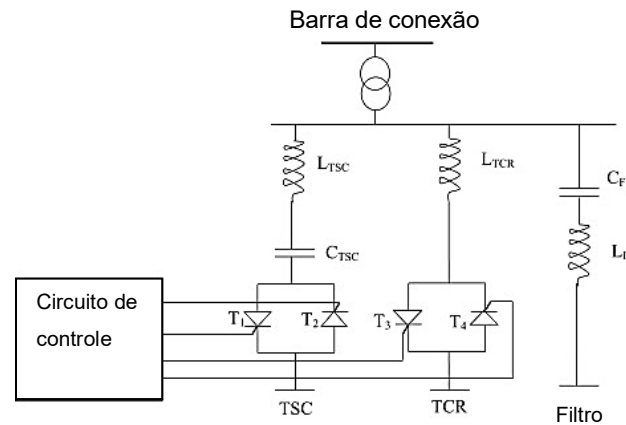
trabalho, é dada ênfase ao SVC, STATCOM, UPFC e SSSC, pois com esses quatro dispositivos é possivelmente ter todos controles possíveis no sistema de potência.

1.2.2.1 Compensador Estático de Reativos

Quando chaveados eletronicamente, os capacitores utilizados tanto na compensação *shunt* quanto na compensação série, provocam transitórios elétricos de menor intensidade do que aqueles decorrentes da inserção brusca de grandes blocos de potência reativa. Isto porque o chaveamento eletrônico permite o acoplamento dos capacitores nos instantes mais favoráveis da tensão e da corrente. Adicionalmente, a inserção ou retirada de potência reativa capacitiva, em blocos menores, reduz os riscos de ressonâncias resultante da interação entre a capacitância de compensação e as reatâncias indutivas do sistema (ressonância sub-síncrona). Não obstante, estas vantagens quando comparado com o chaveamento mecânico, o chaveamento eletrônico não possibilita o controle da energia armazenada no capacitor, que é dada pela metade do quadrado da tensão sobre o capacitor, multiplicada pela sua capacitância. Como a tensão do barramento do sistema onde o banco capacitivo está acoplado é constante, a chave eletrônica se limita a inserir ou retirar os blocos capacitivos do sistema. Assim, o controle da capacitância se dá por passos de reativos capacitivos (Paschoreli Junior, 2007).

Contudo, é possível utilizar dispositivos eletrônicos para que a corrente que passa por um banco de reatores seja controlada, a partir da atuação sobre o ângulo de disparo das chaves eletrônicas. Como a energia armazenada no reator é uma função da metade do quadrado da corrente, multiplicada pela sua indutância, a potência reativa indutiva é passível de controle. Desta forma, associando-se um banco de capacitores chaveado (TSC) com um banco de reatores controlado eletronicamente, denominado TCR (do Inglês, *Thyristor Controlled Reactor*), obtém-se um controle suave da potência reativa trocada entre o compensador e o sistema. A esta associação, quando conectada em derivação com o sistema de potência, dá-se o nome de compensador estático de reativos, ou SVC (Paschoreli Junior, 2007). O diagrama simplificado do SVC é apresentado na Figura 01.

Figura 01: Compensador estático de Reativos

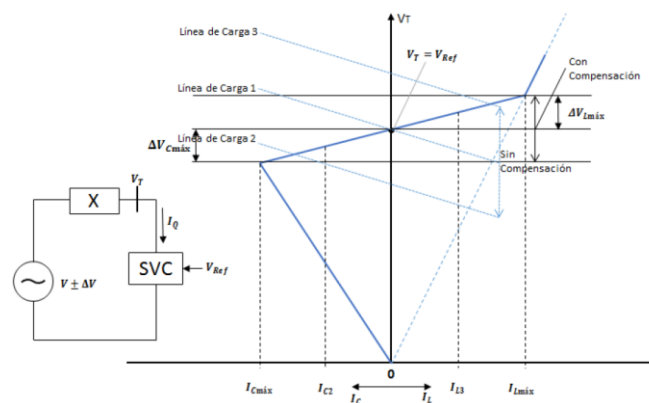


Fonte: (SILVEIRA, 2011).

O SVC é usado para regular a tensão na barra o qual é conectado. Isso em virtude da sua capacidade de injetar reativos, por meio do banco de capacitores, assim como de absorver reativos, por meio do banco de reatores, porém o SVC não se limita somente ao controle de tensão, também é utilizado para amortecimento de transitórios e para reforçar a estabilidade dinâmica dos sistemas de potência. O SVC possui a desvantagem quando se trata da sua capacidade de suporte de reativos, em virtude da mesma ser reduzida na proporção quadrática com a redução da tensão no barramento no qual o mesmo é conectado, ou seja, a medida que se necessita de suporte de tensão, menos reativos-capacitivo se tem disponível.

A capacidade de regulação de tensão pelo SVC é avaliada pela curva V-I, que define a faixa de operação do SVC. Os limites da curva V-I são determinados através dos máximos valores das reatâncias dos bancos de reatores e capacitores. A regulação apresenta uma pequena inclinação, indicando uma tolerância na variação da tensão. A curva V-I do SVC é apresentada na Figura 02.

Figura 02: curva V-I do SVC



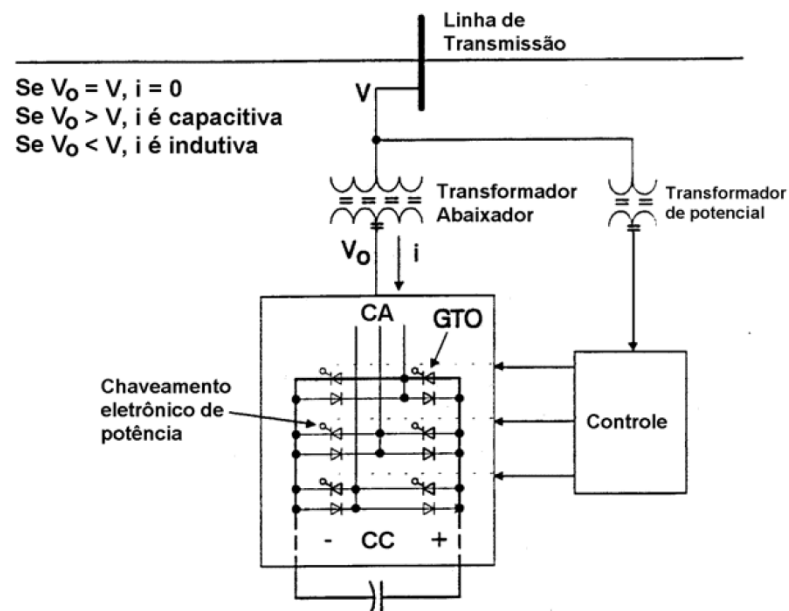
Fonte: (SÁNCHEZ, 2014).

1.2.2.2 Compensador Estático Síncrono

O compensador estático síncrono, ou STATCOM, conectado em derivação com o sistema, pertence ao grupo avançado de controladores FACTS, que utilizam conversores como fonte de tensão síncrona na compensação, no lugar dos tradicionais elementos passivos (reatores e capacitores). Normalmente empregam componentes eletrônicos de comutação forçada, de tecnologia *turn-off* (IGBTs, GTOs, MCTs) e sua tensão de saída é controlada utilizando modulação PWM (do Inglês, *Pulse-Width Modulation*) ou mesmo por operação em multi-pulsos (normalmente maior que 24 pulsos). O princípio de compensação utilizando STATCOM é análogo ao SVC (Paschoreli Junior, 2007).

A partir de uma tensão CC mantida por um capacitor, o conversor como fonte de tensão produz uma tensão de saída trifásica, cuja componente fundamental é uma função senoidal com a frequência da rede. O controle, por PWM, da amplitude da tensão de saída do conversor, que está em fase com a tensão no barramento de acoplamento, permite a compensação de reativos a partir de diferença de tensão, na Figura 03 é mostrado um esquema básico do STATCOM.

Figura 03: Esquema básico do STATCOM

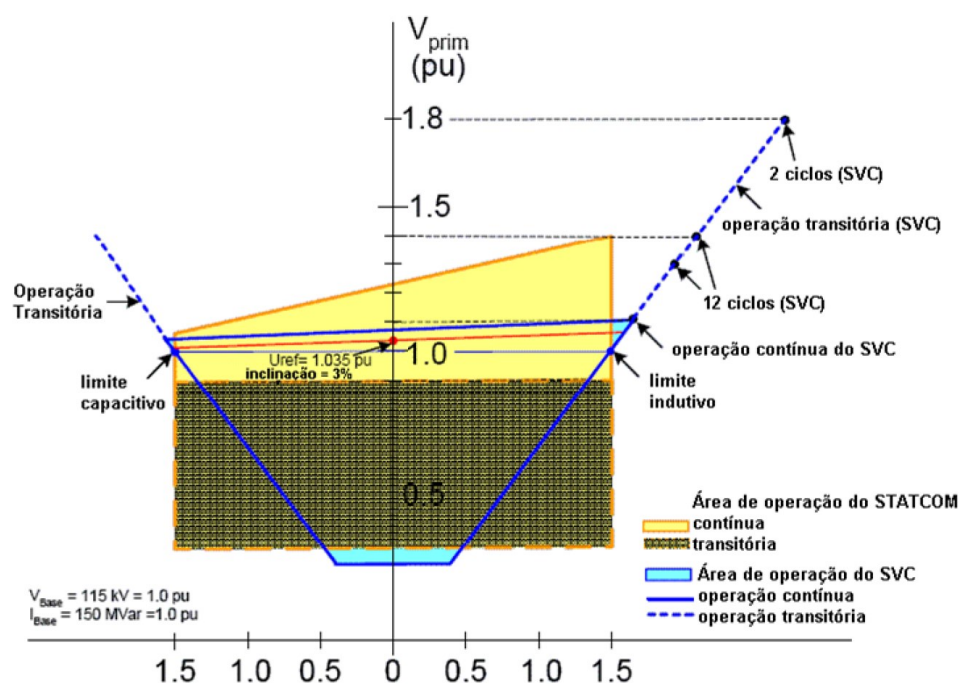


Fonte: (JÚNIOR, 2007).

O STATCOM possibilita o controle dinâmico da tensão no barramento onde é conectado e o amortecimento de oscilações, contribuindo para a estabilidade transitória do sistema. Por não utilizar componentes passivos no armazenamento de energia, o STATCOM tem tamanho reduzido quando comparado com um SVC. Além

disso, promove compensação baseada na potência instantânea (AKAGI e NABAE, 1984). Isso leva o STATCOM a ser um compensador de atuação mais rápida e efetiva que os seus similares passivos. Uma grande vantagem associada à operação do STATCOM é a capacidade de proporcionar compensação capacitiva e indutiva independentemente da tensão no barramento do sistema CA, diferentemente do que ocorre com o SVC. Esta vantagem leva o STATCOM a ser mais eficiente para manter a estabilidade transitória do sistema. Na Figura 04 é mostrada uma comparação entre as curvas V-I do SVC e STATCOM.

Figura 04: Comparação entre as curvas V-I do SVC e STATCOM



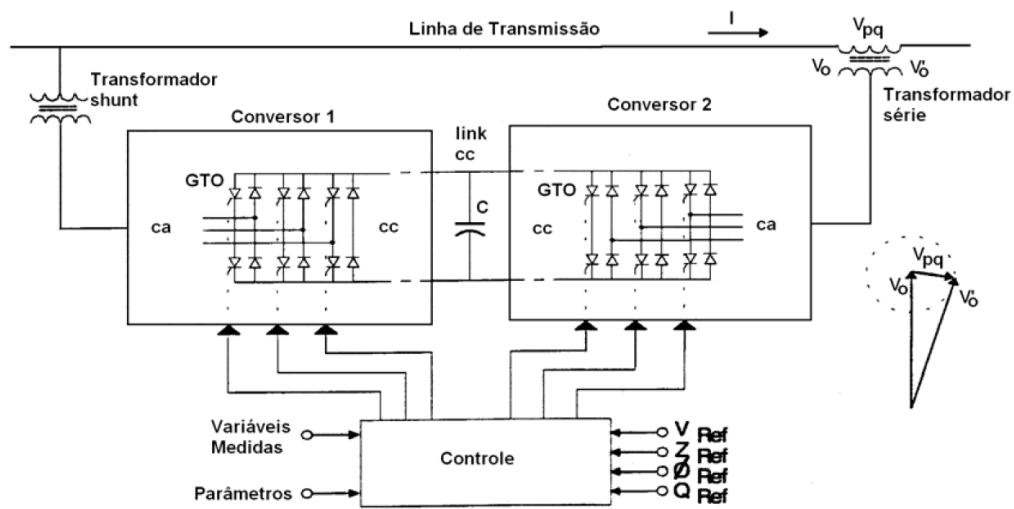
1.2.2.3 Compensador Unificado de Fluxo de Potência

O controlador unificado de fluxo de potência, ou UPFC, é um compensador avançado composto por dois conversores estáticos síncronos, um conectado em derivação (conversor 1) e outro conectado em série com a linha de transmissão (conversor 2). O UPFC é capaz de controlar, simultaneamente, a magnitude da tensão na barra onde o conversor 1 está alocado e o fluxo das potências ativa e reativa na linha de transmissão à qual o UPFC é inserido (Paschoreli Junior, 2007).

O conversor 1, em derivação com o sistema, promove o controle da magnitude da tensão no barramento onde está conectado, atuando como um STATCOM. O compensador 1 é conectado ao compensador 2, ligado em série com a linha de

transmissão, através de um *link* de corrente contínua. No *link* CC, há um capacitor para manter a tensão CC em um valor constante. O conversor 2, denominado compensador estático síncrono série, ou SSSC, atua como uma fonte de tensão série (V_{pq}), controlada em magnitude e em fase. Desta forma, é possível controlar independentemente as potências ativa e reativa fluindo pela linha. Se a relação entre a tensão inserida em série com a linha de transmissão e a corrente que passa nessa linha implicar em uma troca de potência ativa, o conversor 1 deve providenciar a potência ativa demandada pelo conversor 2, já que não há potência armazenada no lado CC para este fim. Um diagrama unifilar simplificado do UPFC é apresentado na Figura 05 (Paschoreli Junior, 2007).

Figura 05: Diagrama simplificado do UPFC



Fonte: (JÚNIOR, 2007).

Em virtude do alto custo e significativa dificuldade na operação simultânea dos conversores *série/shunt*, o UPFC ainda não se consolidou como uma alternativa viável. Porém, é o mais promissor dos FACTS sugeridos até o momento.

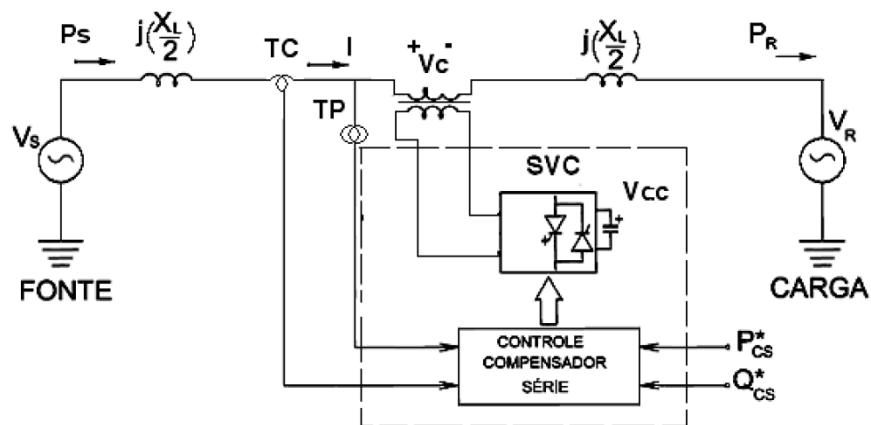
1.2.2.4 Compensador Estático Síncrono Série

O SSSC é um compensador FACTS similar ao STATCOM. Utiliza conversor como fonte de tensão síncrona, que gera uma tensão de compensação a ser inserida em série com a linha de transmissão, independentemente da corrente de linha. Este compensador oferece uma alternativa à compensação série convencional de linhas de transmissão.

O SSSC pode ser considerado, funcionalmente, como um gerador ideal, que pode produzir um conjunto de tensões alternadas, trifásicas e equilibradas, à frequência fundamental, com amplitude e ângulo de fase controlável. Desta forma, o

SSSC pode gerar ou absorver potências ativa e reativa, dependendo da relação angular entre a tensão inserida em série com a linha de transmissão e a corrente através desta linha. Assim, o SSSC pode interferir nas potências ativa e reativa do sistema AC, a partir do controle da magnitude e da posição angular da tensão injetada com relação a corrente na linha (Alampi Filho, 2005). Na Figura 06 é apresentado um diagrama básico do SSSC.

Figura 06: Esquema básico do SSSC



Fonte: (FILHO, 2005).

O SSSC é conectado à linha de transmissão através de um transformador série. Uma maneira de controlar a tensão inserida em série com a linha de transmissão é utilizar os conceitos de potência ativa e reativa instantânea (AKAGI e NABAE, 1984).

As variáveis P_{cs}^* e Q_{cs}^* são sinais de referência. Se apenas a potência reativa for compensada pelo conversor, o sinal P_{cs}^* é considerado como nulo. Nessa situação, o SSSC atua como compensador série de reativos, convencional. Mas, como um compensador avançado (faz uso de conversores), é plenamente possível trocar potência ativa com o sistema. Com isso, é possível interferir na magnitude da tensão na extremidade da linha de transmissão oposta à extremidade na qual o compensador está conectado. Porém, quando o SSSC atua operando como compensador de ativos, há um fluxo de potência no lado CC do conversor como fonte de tensão, o que exige um armazenador de energia, capaz de armazenar a potência que flui do sistema para o SSSC, ou um gerador CC capaz de gerar a potência que flui do SSSC para o sistema CA.

O SSSC consegue funcionar como uma reatância em série controlável, o SSSC não usa reatâncias passivas ligadas em série com a linha, por isso, a potência reativa trocada com a linha não depende da corrente que circula na linha. Não ocorre por isso

o efeito autorregulador como nos compensadores série tradicionais comandados por tiristores, e deste modo a tensão injetada em série pelo compensador pode ser controlada independentemente da corrente na linha (DIXON, *et al.*, 2005)

Como consegue operar na zona indutiva e capacitiva, o SSSC é o mais versátil de todos os compensadores série, possuindo também um tempo de resposta inferior, tornando-o mais eficaz na resposta a fenômenos transitórios e dinâmicos na rede.

O condensador do SSSC pode ser substituído por uma fonte de potência DC, dando ao SSSC a capacidade de compensar a resistência da linha, fornecendo potência ativa de modo a compensar as perdas ativas na linha. Desta maneira consegue aumentar a relação X/R de uma linha, independentemente do nível de compensação série. Outros compensadores série descritos não possuem esta capacidade.

Como o SSSC encontra-se inserido em série através de transformadores de acoplamento, não necessita de ser dimensionado para a potência nominal da linha, porque a corrente da linha passa apenas pelo transformador de acoplamento e não pelo SSSC em si. Existem vários outros compensadores que são inseridos diretamente na linha, tendo que suportar a potência nominal da linha de transmissão.

Também não necessita de ser colocado em plataformas de isolamento para alta tensão pois o transformador de acoplamento permite o acoplamento entre sistemas com dois níveis de tensão diferentes. Assim o SSSC pode ser colocado em locais ao potencial do solo porque pode operar com níveis de tensão relativamente baixos, tipicamente abaixo dos 20kV (caso do sistema de distribuição).

1.2.3 Dispositivos FACTS Distribuídos (D-FACTS)

O conceito D-FACTS foi desenvolvido no *Georgia Institute of Technology*. A Figura 07 ilustra os dispositivos D-FACTS sendo fixados nos condutores da linha de transmissão. Os dispositivos D-FACTS são distribuídos ao longo da linha de transmissão/distribuição. São dispositivos monofásicos com um único grampo de dispositivo em torno de cada um dos condutores de fase no mesmo local. Isso pode ser repetido em locais específicos ao longo da linha de transmissão/distribuição. Como a falha de um desses dispositivos tem um efeito muito limitado em toda a aplicação, a confiabilidade é melhorada (DIVAN; JOHAL, 2007).

Figura 07: D-FACTS ao longo da linha de distribuição



Fonte: (JOHNSON, 2020).

Dentre muitos D-FACTS existentes, são enfatizados apenas o DRV (do Inglês, *Dynamic Voltage Restorer*) e o DSSC (do Inglês, *Distributed Static Series Compensator*).

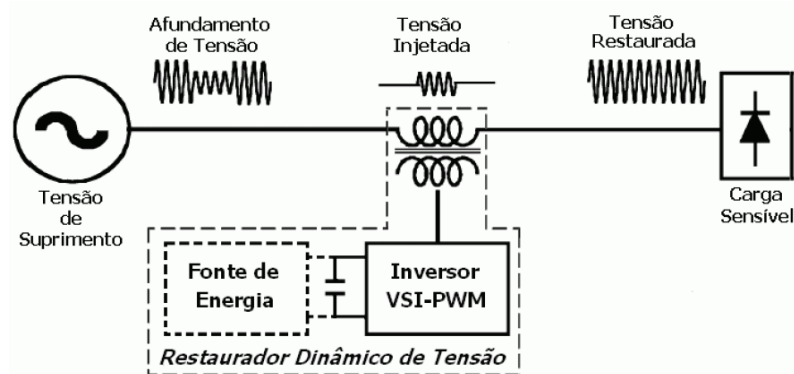
1.2.3.1 Restaurador de Tensão Dinâmico

As preocupações com os diversos assuntos relacionados à qualidade da energia elétrica têm sido cada vez mais comuns às empresas de energia e aos consumidores em geral, e vêm assumindo importância destacada nos cenários nacional e internacional. Tais preocupações são voltadas para a ocorrência de distúrbios elétricos capazes de comprometer o desempenho e a vida útil de equipamentos e dispositivos, além de afetar ou interromper variados processos industriais. Desses distúrbios, as VTCDs (variações de tensão de curta duração) são consideradas as que mais causam prejuízos significativos aos consumidores, tendo como principais vítimas as indústrias (JESUS; SAMESIMA, 2008).

Com isso, já existe na literatura técnica uma série de metodologias de prevenção e variados dispositivos de atenuação dos efeitos das VTCDs. Destes dispositivos, destaca-se o restaurador dinâmico de tensão, ou DVR, que é um compensador estático série avançado aplicado à distribuição de energia elétrica e que representa hoje o que há de mais moderno na mitigação de VTCDs classificadas como afundamentos e elevações de tensão, mostrando ser uma ótima aplicação para consumidores com potência total na faixa de 100 kW a 10 MW (JESUS; SAMESIMA, 2008).

Na configuração mais simples, o DVR possui um inversor VSI-PWM associado a um circuito de controle, um capacitor conectado ao lado CC do inversor e um transformador de acoplamento conectando o inversor em série com o sistema CA, como mostrado na Figura 08.

Figura 08: Esquema básico do DRV



Fonte: (JESUS e SAMESIMA , 2008).

No momento do distúrbio, o DVR injeta a diferença entre a tensão desejada para a carga e a tensão remanescente do sistema, restabelecendo, assim, a amplitude da tensão pré-distúrbio.

O capacitor, funciona como um armazenador de energia do DVR, e dessa forma simula uma fonte de tensão CC. No momento da compensação, o inversor VSI-PWM absorve a energia armazenada no capacitor para sintetizar uma tensão a ser injetada no sistema através do transformador série.

Dependendo da topologia do DVR, pode ou não existir uma fonte de energia suprindo o capacitor para a melhoria do seu desempenho durante o distúrbio e para recarregá-lo ao término do mesmo, conforme é ilustrado na Figura 08. Essa fonte de energia pode ser o próprio sistema, outro sistema independente, através da conexão de um conversor CA-CC, ou até uma fonte de armazenagem de energia.

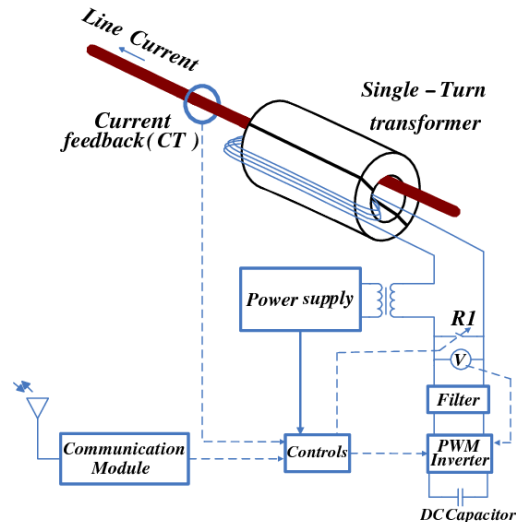
O princípio básico de funcionamento do controle de um restaurador dinâmico de tensão é a medição da grandeza controlada, que, quando comparada com o respectivo valor de referência, produz um sinal de erro. Esse erro é reduzido até a sua completa extinção. O tempo necessário para a extinção desse erro, ou para a completa mitigação do distúrbio, é o fator que determina a eficiência não só do sistema de controle, mas de todo o conjunto que compõe o DVR (JESUS; SAMESIMA, 2008).

1.2.3.2 Compensador Série Estático Distribuído

O DSSC é um compensador série com capacidades de controle semelhantes ao SSSC. O DSSC é menos volumoso, mais barato e mais confiável que o SSSC quando comparamos potências nominais idênticas. Consiste de um pequeno inversor monofásico, em um transformador coaxial e respectivos circuitos de controle, de

alimentação e de comunicação embutidos (Vilathgamuwa *et al.*, 2004) Figura 09 é apresentado um arranjo básico do DSSC.

Figura 09: Esquema básico do DSSC



Fonte: (DIVAN e JOHAL, 2007).

O DSSC apresenta as seguintes vantagens em comparação ao SSSC:

- ✓ Investimento inicial reduzido e poucos gastos em eletrônica de potência;
- ✓ Simples instalação, manutenção e reparação;
- ✓ Maior confiabilidade (a probabilidade de todos os módulos avariarem em simultâneo é reduzida).

O DSSC é uma ferramenta mais complexa em comparação ao SSSC, exigindo meios de controle e de comunicação sofisticados, mas com as tecnologias atuais este problema é cada vez menos relevante (JALAYER; MOKHTARI, 2009)

De acordo com a Figura 09, o transformador de uma volta (STT) é acoplado magneticamente à linha de transmissão/distribuição, o STT tem a finalidade de acoplar magneticamente o módulo de potência à linha. Por meio do transformador monofásico, é possível injetar uma tensão desejada na linha. A alimentação CC necessária pode ser obtida diretamente do secundário do STT para fornecer fonte CC para o controlador do inversor. Além disso, um transformador de corrente é usado para fornecer um sinal de *feedback*. As condições de operação podem ser alteradas de acordo com um sinal recebido usando uma comunicação sem fio. A chave de R1 é fechada quando a corrente de linha está abaixo de um certo limite. O condutor de fase é usado como primário do STT.

Os dispositivos FACTS tradicionais são plenamente possíveis de serem usados no sistema de distribuição de energia elétrica. Em Masuda (2006) é apresentada uma simulação de desempenhos dos FACTS quando aplicados no sistema de distribuição.

1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

Em virtude da semelhança entre o DSSC e o SSSC, inclusive na capacidade de controle, nesse trabalho optou-se por adotar o modelo matemático do SSSC no sistema de distribuição de energia elétrica com o intuito da atenuação das perdas ao longo do sistema. Sua localização de instalação no sistema e regulação de seus parâmetros são, então, determinados por meio de um problema de otimização solucionado por um algoritmo evolutivo.

Após a contextualização do problema neste primeiro capítulo de introdução, no capítulo 2 é feita uma explanação acerca do fluxo de potência no sistema de distribuição de energia elétrica, com o objetivo central de obter o estado da rede, nos termos de tensão elétrica, corrente elétrica, potências elétricas, e para tal é apresentado o método de soma das potências convencional, em um primeiro momento no sistema monofásico, e posteriormente é feita uma expansão para o sistema trifásico. Além de ser feita uma inserção do SSSC no sistema de distribuição de energia elétrica, ainda é definida a função objetivo a qual faz parte desse trabalho e consequentemente o fluxo de potência ótimo.

No capítulo 3 é apresentado um algoritmo genético, e é mostrada a sua forma de funcionamento dentro do problema central desse trabalho, que a alocação do SSSC dentro dos sistemas de distribuição adotados. Além do mais, é ressaltado a penalização da função objetivo para os casos de violações de limites operacionais estabelecidos e todo processo de codificação usado no algoritmo genético.

No capítulo 4 é mostrado todos os resultados obtidos no decorrer das simulações computacionais realizadas ao longo desse trabalho, além de uma breve análise de tais resultados, também é realizada uma apresentação dos carregamentos do sistema de energia elétrica.

No capítulo 5 é feita as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

2. FLUXO DE POTÊNCIA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O principal objetivo do cálculo do fluxo de potência em redes de distribuição de energia elétrica é determinar o estado da rede, como magnitudes das tensões dos nós e das correntes de linha, por meio das equações de balanço de potência (Sheblé. Uma análise comum é, por exemplo, uma solução anual de 8760 horas usando perfil de carga para classificar cargas em risco de não serem atendidas em caso de falha de algum componente da *smart grid* (DUGAN e MCDERMOTT, 2011). A análise de comportamento da automação avançada usa técnicas híbridas para simular transitórios em sistemas de distribuição (REIZ e LEITE, 2021) exigindo algoritmos mais rápidos e eficientes para calcular o fluxo de potência.

Métodos de cálculo de fluxo de potência tradicionais consideram o sistema trifásico de energia elétrica balanceado e condutores em transposição completa usando, assim, uma representação em sequência positiva. Devido às características específicas das redes de distribuição, como o desbalanceamento da rede trifásica (SCHNEIDER, 2018) a convergência dos métodos tradicionais não é garantida.

Métodos eficientes para solução do problema fluxo de potência em redes de distribuição são divididos em duas categorias principais: 1) métodos que utilizam a matriz de impedância nodal (Chen *et al.*, 1991); e 2) métodos de varredura direta e reversa, que podem ter formulação em soma de correntes (CHENG e SHIRMOHAMMADI, 1995), ou em soma de potência (FALCÃO, 2003). A formulação biquadrada do método da soma de potências (MSP) de (BARAN e WU, 1989) apresenta explicitamente a equação do balanço de potência em função do fluxo de potência nas linhas de distribuição permitindo, assim, sua aplicação direta na formação do conjunto de restrições de igualdade do FPO no sistema de distribuição.

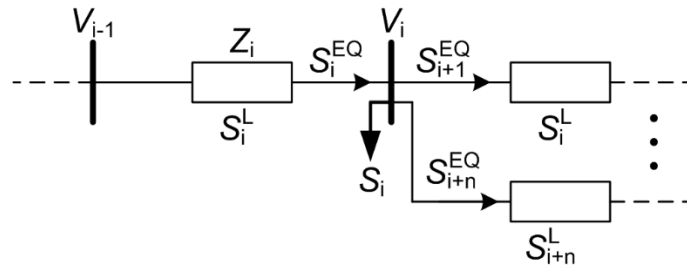
A formulação biquadrada do MSP também assume uma representação em sequência positiva, *i.e.* uma representação monofásica. Logo, neste capítulo, é proposta a expansão da formulação biquadrada para redes trifásicas de distribuição.

2.1 MÉTODO DA SOMA DE POTÊNCIAS CONVENCIONAL

Embora as redes de distribuição sejam malhadas, elas operam com topologia radial. Portanto, os métodos de varredura direto e reverso se beneficiam dessa radialidade e se tornaram um método típico em muitos programas de análise de sistema de distribuição. A principal fonte de energia às redes de distribuição é a

subestação, a barra de referência mais à montante, que possui magnitude de tensão conhecida. Por exemplo, no trecho da rede de distribuição apresentado na Figura 10, a barra $i-1$ está à montante da barra i , logo a magnitude de tensão V_i pode ser determinada em termos de V_{i-1} .

Figura 10: Parte de uma rede de distribuição radial



Fonte: Própria do Autor

No trecho da rede de distribuição apresentado, destacam-se as grandezas elétricas associadas a i -ésima barra e em suas linhas adjacentes, como V_i , o módulo tensão na i -ésima barra.

Além da potência da carga na i -ésima barra, dada por (01), se destacam-se a impedância da linha entre as barras $i-1$ e i , dada por (02), potência equivalente fluindo entre as barras $i-1$ e i , dada por (03), perda na linha entre as barras $i-1$ e i , dada por (04).

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i \quad (01)$$

$$\bar{Z}_i = R_i + jX_i \quad (02)$$

$$\bar{S}_i^{EQ} = P_i^{EQ} + jQ_i^{EQ} \quad (03)$$

$$\bar{S}_i^L = P_i^L + jQ_i^L \quad (04)$$

Sendo, $\bar{S}_i$ a potência complexa na i -ésima barra, P_i potência ativa na i -ésima barra, Q_i potência reativa na i -ésima barra, $\bar{Z}_i$ impedância complexa na linha adjacente à montante da i -ésima barra, $\bar{S}_i^L$ potência complexa referente as perdas na linha adjacente, P_i^{EQ} potência ativa equivalente que flui entre as barras $i-1$ e i , Q_i^{EQ} potência reativa equivalente que flui entre as barras $i-1$ e i , P_i^L perda ativa na linha entre as barras $i-1$ e i do sistema, Q_i^L perda reativa na linha entre as barras $i-1$ e i do sistema.

A solução do problema de fluxo de potência em um sistema radial, usando o MSP, consiste em resolver, para cada trecho da rede, uma equação do quarto grau

em termos de tensão nodal. A equação da tensão nodal para o cálculo da magnitude da tensão é dada por (05), sendo (06) e (07) partes integrantes de (05).

$$V_i^4 + A_i V_i^2 + B_i = 0 \quad (05)$$

$$A_i = 2(P_i^{EQ} R_i + Q_i^{EQ} X_i) - V_{i-1}^2 \quad (06)$$

$$B_i = \left((P_i^{EQ})^2 + (Q_i^{EQ})^2 \right) (R_i^2 + X_i^2) \quad (07)$$

A solução de (05) para V_i fornece quatro raízes, onde apenas uma possui sentido físico, sendo assim, a magnitude da tensão V_i pode ser obtida como o auxílio de (08) (PAIVA, 2006).

$$V_i = \sqrt{\frac{-A_i}{2} + \sqrt{\left(\frac{A_i}{2}\right)^2 - B_i}} \quad (08)$$

As potências equivalentes ao longo do sistema dado na Figura 10, de acordo com (PAIVA, 2006) são calculadas da seguinte forma:

$$P_i^{EQ} = P_i + \sum_{j=1}^{n_i} (P_j^{EQ} + P_j^L) \quad (09)$$

$$Q_i^{EQ} = Q_i + \sum_{j=1}^{n_i} (Q_j^{EQ} + Q_j^L) \quad (10)$$

em que P_i é a potência ativa na barra i , Q_i é a potência reativa na barra i , P_j^L é a perda ativa na j -ésima linhas adjacente à jusante da barra i , Q_j^L é a potência reativa da perda na linha j , P_j^{EQ} é a potência ativa equivalente na linha j , Q_j^{EQ} é a potência reativa equivalente na linha j , e n_i é a quantidade de linhas adjacentes à jusante da barra i .

De acordo com Paiva (2006), as perdas ao longo do sistema de distribuição são calculadas da seguinte forma:

$$P_i^L = R_i \left((P_i^{EQ})^2 + (Q_i^{EQ})^2 \right) / V_i^2 \quad (11)$$

$$Q_i^L = X_i \left((P_i^{EQ})^2 + (Q_i^{EQ})^2 \right) / V_i^2 \quad (12)$$

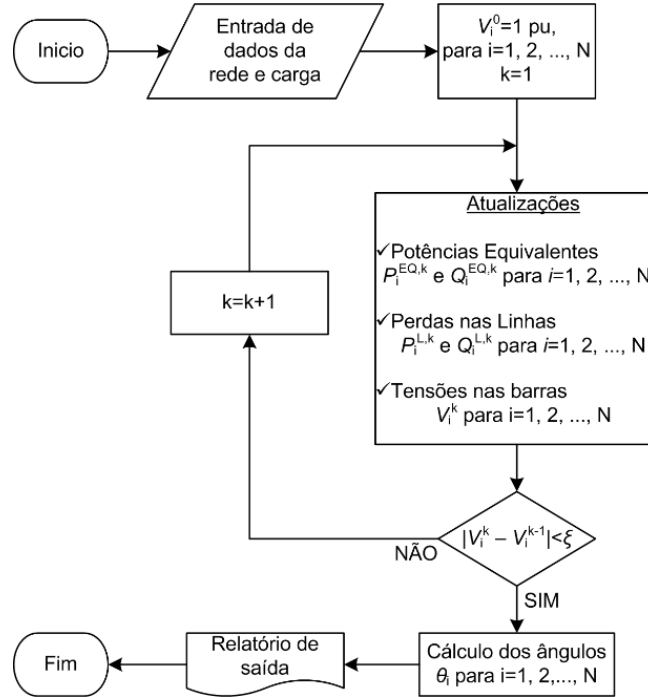
Em que R_i é a resistência na linha em que está se determinando a perda e X_i a reatância na linha em que está se determinando a perda.

Observe-se que ao longo dos procedimentos dos cálculos não houve necessidade de conhecer os ângulos das tensões nodais. Após a convergência pode-se calcular a abertura angular do trecho, conforme a equação (13).

$$tg\theta_{i,i-1} = \frac{P_i^{EQ} X_i - Q_i^{EQ} R_i}{P_i^{EQ} R_i + Q_i^{EQ} X_i + V_i^2} \quad (13)$$

O fluxograma de todo o processo iterativo do algoritmo de cálculo do fluxo de potência pelo MSP é apresentado na Figura 11.

Figura 11: Fluxograma do algoritmo de cálculo do fluxo de potência pelo MSP



Fonte: Adaptado de (PAIVA, 2006)

No algoritmo, k é o contador de iteração e ξ é o valor da tolerância de tensão predefinida antes da realização do algoritmo iterativo. Quando o módulo da diferença entre a tensão na iteração atual e na iteração anterior for menor que a tolerância dada, significa que o algoritmo convergiu.

2.2 BREVE DISCUSSÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO PARA SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Geralmente, um FPO é um problema de otimização não convexo e não linear para minimizar certos objetivos do sistema de potência sujeitos a várias restrições de desigualdade e igualdade ao determinar as melhores variáveis de controle para uma determinada configuração de carga. A forma geral do problema de FPO pode ser representada por (14).

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } f(\mathbf{x}) \\ & \text{Sujeito a } \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \\ & \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \end{aligned} \quad (14)$$

em que $f(x)$ é a função objetivo a ser minimizada, x é o vetor das variáveis de otimização, $g(x)$ é o vetor composto pelas restrições de igualdade e $h(x)$ é o vetor composto pelas restrições de desigualdade.

Particularmente, as restrições de igualdade são tipicamente modeladas pelas equações de balanço de potência, garantindo que, ao final da solução do problema de FPO, as demandas de potência ativa e reativa, além das perdas nas linhas de distribuição, são totalmente supridas pela fonte do sistema. Desta forma, a equação (05), que é fundamental ao MSP, representa explicitamente o balanço de potência podendo ser utilizada no conjunto de restrições de igualdade do FPO para uma rede elétrica com N barras.

Embora a formulação do MSP possibilite a resolução do FPO, as redes de distribuição são trifásicas. Outras características são: operação com topologia radial ou fracamente malhada; alimentadores com baixa relação X/R ; e cargas desequilibradas (MOMOH, 2017). Na literatura, a modificação do MSP para redes trifásicas aplica o método das fontes fictícias de tensão (TRINDADE JUNIOR, 2005), que é originalmente desenvolvido para a análise transitória ou em regime permanente de circuitos elétricos com elementos não-lineares e/ou com parâmetros variantes no tempo. Este procedimento faz a correção da tensão usando um algoritmo iterativo externo sem modificar a equação biquadrada fundamental do MSP, mantendo-a na forma monofásica original.

Neste capítulo, por outro lado, propõe-se expansão da equação biquadrada do MSP para calcular a tensão trifásica nodal. Essa expansão da formulação possibilita sua aplicação direta à resolução do FPO em redes de distribuição formando o conjunto de restrições de igualdade que representa o balanço de potência trifásico.

2.3 MSP COM FORMULAÇÃO TRIFÁSICA

A expansão do MSP consiste em incluir o acoplamento magnético entre as fases da rede de distribuição para o cálculo das tensões trifásicas nodais. Nesta formulação, somente a forma da equação biquadrada fundamental do MSP é preservada, assim, sua expansão permite determinar o módulo da tensão nodal em cada uma das p fases (a, b e c, respectivamente, para $p = 0, 1$ e 2) conforme a equação (15).

$$V_{i,p}^4 + A_{i,p}V_{i,p}^2 + B_{i,p} = 0, \quad p = 0, 1, e 2 \quad (15)$$

Sendo:

$$A_{i,p} = 2\left(\sum_{q=0}^2 (P_{i,q}^{EQ} R_{i,pq} + Q_{i,q}^{EQ} X_{i,pq}) \cos((p-q)2\pi/3)\right) - V_{i-1,p}^2 \quad (16)$$

$$B_{i,p} = \sum_{q=0}^2 \left((P_{i,q}^{EQ})^2 + (Q_{i,q}^{EQ})^2 \right) Z_{i,pq} \quad (17)$$

As potências equivalentes, com o mesmo conceito das equações monofásicas, são dadas por (19) e (20), além da impedância na linha que é dada por (18).

$$Z_{i,pq} = \sum_{t=0}^2 (R_{i,pt} R_{i,tq} + X_{i,pt} X_{i,tq}) \quad (18)$$

$$P_{i,p}^{EQ} = P_{i,p} + \sum_{j=1}^{n_i} (P_{j,p}^{EQ} + P_{j,p}^L) \quad (19)$$

$$Q_{i,p}^{EQ} = Q_{i,p} + \sum_{j=1}^{n_i} (Q_{j,p}^{EQ} + Q_{j,p}^L) \quad (20)$$

As perdas nas linhas são dadas pelas equações (21) e (22).

$$P_{i,p}^L = \sum_{q=0}^2 \frac{R_{i,pq} \left((P_{i,q}^{EQ})^2 + (Q_{i,q}^{EQ})^2 \right)}{V_{i,q}^2} \cos\left(\frac{(p-q)2\pi}{3}\right) \quad (21)$$

$$Q_{i,p}^L = \sum_{q=0}^2 \frac{X_{i,pq} \left((P_{i,q}^{EQ})^2 + (Q_{i,q}^{EQ})^2 \right)}{V_{i,q}^2} \cos((p-q)2\pi/3) \quad (22)$$

Em que p, q , e t estão relacionados as fases, sendo a fase a equivalente à 0, b à 1 e c à 2. O subíndice p está relacionado à fase em que está sendo calculado o parâmetro elétrico, tais como perdas, potência equivalente e tensão. Como a impedância da linha é representado por uma matriz 3x3, então o subíndice p está associado à linha, enquanto q associa-se à coluna da matriz. No cálculo de $B_{i,p}$ é utilizado o quadrado da matriz de impedância, assim o subíndice t relaciona a linha e coluna da matriz no produto matricial.

A raiz da equação biquadrada para determinar as tensões nodais trifásicas é dada pela equação (22).

$$V_{i,p} = \sqrt{\frac{-A_{i,p}}{2} + \sqrt{\left(\frac{A_{i,p}}{2}\right)^2 - B_{i,p}}}, \quad p = 0, 1, e 2 \quad (22)$$

Após a convergência pode-se calcular a abertura angular do trecho através da equação (23).

$$tg\theta_{i,i-1,p} = \frac{\sum_{q=0}^2 (P_{i,q}^{EQ} X_{i,pq} - Q_{i,q}^{EQ} R_{i,pq})}{\left(\sum_{q=0}^2 (P_{i,q}^{EQ} R_{i,pq} + Q_{i,q}^{EQ} X_{i,pq}) \delta_{pq}\right) + V_{i,p}^2} \cos((p-q)2\pi/3) \quad (23)$$

Como a forma do equacionamento do MSP é preservada, o algoritmo apresentado na Figura 11 pode ser utilizado no cálculo do fluxo de potência trifásico com poucas modificações. Por exemplo, na rotina de atualização, as grandezas elétricas calculadas, tais como potência equivalente, perdas nas linhas e tensões nodais, são todas trifásicas exigindo um contador p de fase.

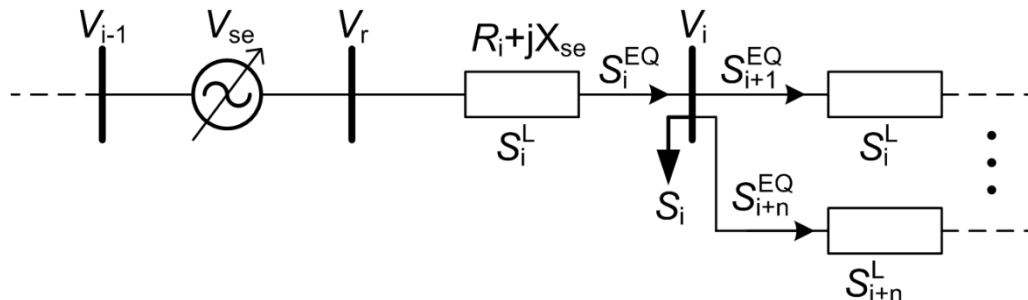
No processo de expansão da formulação do MSP, as linhas de distribuição são representadas por uma matriz de impedância quadrada de dimensão 3, *i.e.* $\bar{Z}_i$, em que a diagonal principal contém a impedância própria dos condutores e fora da diagonal as mútuas entre os condutores de cada fase. Dessa forma, na equação (17), os valores $Z_{i,pq}$ são os elementos da matriz $Z_i^2 = \bar{Z}_i (\bar{Z}_i^*)^T$ calculados conforme a equação (18). Essa expansão trifásica é consistente com a formulação convencional dada por (07) em que $R_i^2 + X_i^2 = Z_i^2$.

Adicionalmente, o efeito do acoplamento magnético entre as fases é realizado através do valor de $\cos((p - q)2\pi/3)$ que projeta a corrente fluindo na fase q para a fase p . Os índices p e q correspondem às fases a, b e c como já mencionado. Assumindo na barra de referência uma tensão trifásica simétrica, os valores de $\cos((p - q)2\pi/3)$ representam os elementos de uma matriz Δ quadrada de ordem 3x3 em que os elementos da diagonal principal são iguais a 1,0 e fora da diagonal principal são iguais a -0,5.

2.4 INCLUSÃO DO SSSC NO MÉTODO DA SOMA DAS POTÊNCIAS

A Figura 12 mostra o circuito equivalente da conexão do SSSC à rede CA. Com o auxílio deste circuito, são desenvolvidas as equações em regime permanente usadas na implementação do SSSC no MSP monofásico, que é utilizado por simplicidade.

Figura 12: Trecho de um alimentador com SSSC



Fonte: Própria do Autor.

Como já mencionado, a principal função do SSSC é o controle do fluxo de potência ativa e reativa, pela adição de uma tensão de magnitude e ângulo controlados, $\dot{V}_{se}$, em série com a linha em que o mesmo está instalado, modificando a tensão de linha imediatamente após o conversor.

$$\dot{V}_{se} = m_{se} k_{cs} V_{CS} \angle \theta_{se} = m_{se} V_{i-1} \angle \theta_{se} \quad (24)$$

Em que m_{se} é a faixa de modulação do PWM do SSSC, k_{cs} é o ganho do conversor mais a taxa de eleição de tensão do transformador, V_{CS} é a magnitude de tensão do lado CC do conversor e θ_{se} é o ângulo da tensão do VSC (conversor de tensão que compõe o SSSC). Supondo que a fonte de tensão adicional seja ideal, a tensão restaurada imediatamente após o conversor pode ser definida como $\dot{V}_r = \dot{V}_{i-1} + \dot{V}_{se}$ (ARAÚJO, 2014).

Sendo conhecidos os valores de P_i^{EQ} , Q_i^{EQ} e $\dot{V}_r = V_{i-1} \angle \theta_{i-1} + m_{se} V_{i-1} \angle (\theta_{i-1} + \theta_{se})$ logo pode-se calcular $\dot{V}_i = V_i \angle \theta_i$ no final o trecho.

$$\frac{\dot{V}_r - \dot{V}_i}{R_i + jX_{se}} = \frac{V_{i-1} \angle \theta_{i-1} + m_{se} V_{i-1} \angle (\theta_{i-1} + \theta_{se}) - V_i \angle \theta_i}{R_i + jX_{se}} \quad (25)$$

A potência complexa na barra destino é dada por (26):

$$\bar{S}_i^{EQ} = P_i^{EQ} + jQ_i^{EQ} = \dot{V}_i \left(\frac{\dot{V}_r - \dot{V}_i}{R_i + jX_{se}} \right)^* \quad (26)$$

Sendo $\dot{V}_i^* = V_i \angle -\theta_i$ e fazendo uma substituição de (25) em (26), tem-se:

$$\frac{P_i^{EQ} - jQ_i^{EQ}}{V_i \angle -\theta_i} = \frac{V_{i-1} \angle \theta_{i-1} + m_{se} V_{i-1} \angle (\theta_{i-1} + \theta_{se}) - V_i \angle \theta_i}{R_i + jX_{se}} \quad (27)$$

Fazendo arranjos, tem-se:

$$V_{i-1} V_i \angle (\theta_{i-1} - \theta_i) - V_i^2 + m_{se} V_{i-1} V_i \angle (\theta_{i-1} - \theta_i + \theta_{se}) = (P_i^{EQ} - jQ_i^{EQ})(R_i + jX_{se}) \quad (28)$$

Separando-se os termos reais e complexos em cada lado da equação (28) e, em seguida, igualando as partes correspondentes, resulta em:

$$V_{i-1} V_i [\cos(\theta_{i-1} - \theta_i) + m_{se} \cos(\theta_{i-1} - \theta_i + \theta_{se})] = V_i^2 + P_i^{EQ} R_i + Q_i^{EQ} X_{se} \quad (29)$$

$$V_{i-1} V_i [\sin(\theta_{i-1} - \theta_i) + m_{se} \sin(\theta_{i-1} - \theta_i + \theta_{se})] = P_i^{EQ} X_{se} + Q_i^{EQ} R_i \quad (30)$$

Elevando ao quadrado (29) e (30), somando o resultado correspondente e posteriormente fazendo uso das propriedades trigonométricas, chega-se a:

$$V_i^4 + 2 \left(P_i^{EQ} R_i + Q_i^{EQ} X_{se} - \frac{1}{2} V_{i-1}^2 (1 + m_{se}^2 + 2m_{se} \cos \theta_{se}) \right) V_i^2 + (R_i^2 + X_{se}^2) (P_i^{EQ^2} + Q_i^{EQ^2}) = 0 \quad (31)$$

A equação (31) é semelhante a equação (05), porém agora há o modelo do dispositivo FACTS inserido no MSP e, em virtude disso, surge a equação quadrática (31) modificando o valor da tensão V_{i-1} , porém, se $m_{se} = 0$, ou seja, não tiver compensação, a equação (31) volta em seu estado original. Nota-se que esse é um caso ideal de SSSC, porque o dispositivo quando instalado na rede, possui sua reatância equivalente série, X_{CS} , que se soma à reatância do trecho em que o FACTS estiver instalado, ou seja $X_{se} = X_{CS} + X_i$. Para a formulação trifásica do MSP, a compensação na i -ésima barra pode ser dada por (32)

$$E_i = 1 + m_{se,i}^2 + 2m_{se,i}\cos\theta_{se,i} \quad (32)$$

2.5 MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA ALOCAÇÃO DO SSSC

O controle do fluxo de potência na rede e da tensão nas barras onde o SSSC está conectado é feito mediante ajuste dos parâmetros $m_{se,i}$ e $\theta_{se,i}$. Para efetuar esses ajustes de forma automática, deve-se resolver o problema de FPO usando os parâmetros de ajuste do SSSC como variáveis de controle.

$$\min f(\mathbf{x}) \quad (33)$$

s. a.

$$V_{i,p,j}^4 + A_{i,p,j}V_{i,p,j}^2 + B_{i,p,j} = 0, \quad \forall i \in \Omega_b, \forall j \in \Omega_t \text{ e } p = 0, 1, \text{ e } 2 \quad (34)$$

$$V^{MIN} \leq V_{i,p,j} \leq V^{MAX}, \quad \forall i \in \Omega_b, \forall j \in \Omega_t \text{ e } p = 0, 1, \text{ e } 2 \quad (35)$$

$$y_i m_{se}^{MIN} \leq m_{se,i,j} \leq y_i m_{se}^{MAX}, \quad \forall i \in \Omega_b \text{ e } \forall j \in \Omega_t \quad (36)$$

$$\theta_{se}^{MIN} y_i \leq \theta_{se,i,j} \leq \theta_{se}^{MAX} y_i, \quad \forall i \in \Omega_b \text{ e } \forall j \in \Omega_t \quad (37)$$

$$I_{CS,i,j}(V_{i-1,j}, \theta_{i-1,j}, m_{se,i,j}, \theta_{se,i,j}) \leq I^{MAX}, \quad \forall i \in \Omega_c \text{ e } \forall j \in \Omega_t \quad (38)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \Omega_b \quad (39)$$

Em que Ω_b é o conjunto de todas as barras do sistema, Ω_t é o conjunto nos níveis de carregamento do sistema e Ω_c é o conjunto das barras que contém o SSSC instalado (ARAÚJO, 2014). A equação (34) corresponde à restrição de igualdade representada pela equação biquadrada do MSP. Assumindo a inclusão do conversor série com $X_{CS} = 0$, $A_{i,p}$ é definido como em (40).

$$A_{i,p,j} = 2\left(\sum_{q=0}^2 (P_{i,q,j}^{EQ} R_{i,pq} + Q_{i,q,j}^{EQ} X_{i,pq}) \cos((p-q)2\pi/3)\right) - E_{i,j} V_{i-1,p,j}^2 \quad (40)$$

A restrição (35) estabelece a faixa de operação dos magnitudes de tensão na rede de distribuição, enquanto as restrições (36) e (37) definem os limites da faixa de modulação e ângulo da tensão do conversor, respectivamente. Em (38), a corrente máxima suportada pelo conversor é estabelecida. A variável binária y_i em (39) indica a existência do FACTS na linha adjacente à montante da i -ésima barra.

A função $f(x)$ pode representar uma ou um conjunto de funções com diferentes objetivos, tais como: minimizar perdas, custos de investimento, minimizar o desvio de tensão e etc.

2.6 DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo utilizada na alocação dos dispositivos D-FACTS nas redes de distribuição é composta pelo custo das perdas ativas no ano mais o custo de aquisição dos conversores. Em (41) é definida a formulação para $f(x)$.

$$f(x) = c^e \sum_{j \in \Omega_t} T_j \sum_{i \in \Omega_b} \sum_{p=0}^2 P_{i,p,j}^L + \sum_{i \in \Omega_c} C_i^{cs} \frac{I(1+I)^n}{(1+I)^n - 1} \quad (41)$$

A primeira parcela de (41) representa o custo anual das perdas ativas na rede de distribuição. Neste cálculo é considerado c^e como sendo o custo da energia em R\$/kWh e T_j como a quantidade de horas no ano em que a rede de distribuição opera com j -ésimo nível de carregamento. A segunda parcela da função objetivo está associada à aquisição do conversor.

Os dispositivos D-FACTS/FACTS custam um determinado valor, que requerem um estudo de viabilidade econômica antes de sua instalação junto ao sistema de distribuição de energia elétrica. Logo faz-se necessário apresentar uma maneira de calcular tal custo em função de uma taxa de juros I , um custo de investimento inicial C_i^{cs} para a compra do dispositivo, esse custo também pode ser dado em função da potência suportada pelo conversor, ou seja R\$/kW-ano, e um período de tempo n em anos do ciclo de vida.

3. ALGORITMO GENÉTICO

Algoritmos Evolutivos (AEs) utilizam modelos computacionais dos processos naturais de evolução como uma ferramenta para a resolução de diferentes tipos de problemas. Apesar da ampla variedade de AEs que têm sido desenvolvidos, todos eles têm em comum o conceito de simulação da evolução das espécies para evolução dos indivíduos, por meio dos processos de seleção, mutação e reprodução, sendo que esses dependem da aptidão do indivíduo para o problema em questão. Os mais populares AEs são: algoritmo genético, evolução diferencial, programação genética e sistemas classificadores evolutivos (Silva *et al.*, 2019).

O problema de alocação ótima de dispositivos D-FACTS representa um problema de otimização combinatória, em que tem-se um número determinado de dispositivos a serem alocados em um número finito de barras do sistema elétrico. O ajuste ótimo dos parâmetros θ_{se} e m_{se} do SSSC, por exemplo, caracteriza um problema de otimização contínua.

Os AGs são técnicas heurísticas de otimização global, se opondo a métodos tradicionais de otimização como o do gradiente que seguem a derivada de uma função para encontrar o máximo dela, ficando facilmente retidos em ótimos locais. A busca realizada pelos AGs é estocástica e iterativa não encontrando necessariamente a solução ótima para o problema, mas tendendo a ficar próximo dela (Silva *et al.*, 2019).

A escolha pelo uso do algoritmo genético como método de otimização no decorrer desse trabalho, se dá por sua eficiência na solução de problemas de otimização combinanatorial já conhecida no meio acadêmico.

3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O funcionamento básico dos AGs representa a lei de adaptação/sobrevivência ao meio da seguinte forma.

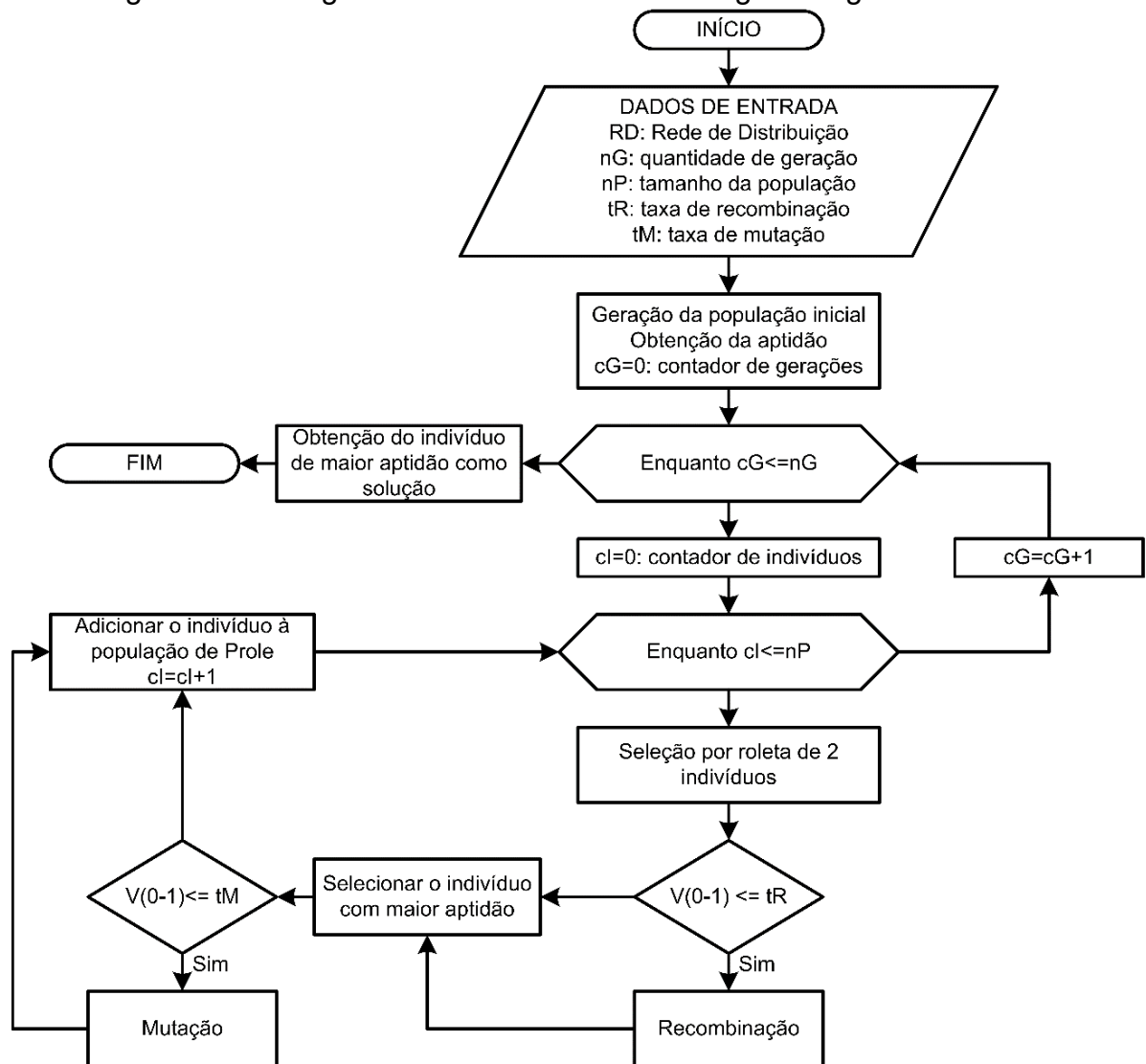
Inicialmente, é gerada uma população formada por um conjunto aleatório de indivíduos que podem ser vistos como possíveis soluções do problema em questão. Durante o processo evolutivo, cada indivíduo é avaliado na função objetivo e, em seguida, lhe é atribuído um “peso” (denominado *fitness*) proporcional à sua avaliação, refletindo sua habilidade de adaptação a determinado ambiente.

Os indivíduos de maior *fitness*, considerados mais aptos, são mantidos no processo de evolução, enquanto que os demais são descartados. Os membros da população preservados podem gerar descendentes por meio de cruzamento e, ainda,

sofrer modificações em suas características fundamentais por mutações genéticas. Esse ciclo é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada.

Uma das formas de melhorar o desempenho do AG com o decorrer das gerações é por meio do elitismo, que consiste em preservar os N melhores indivíduos de cada geração, que passam automaticamente para a geração seguinte. Pode-se esquematizar o AG usado na dissertação como na Figura 13.

Figura 13: Fluxograma de funcionamento do algoritmo genético usado



Fonte: próprio autor.

3.2 ESTRUTURAÇÃO DO ALGORITMO PARA O PROBLEMA

A alocação e ajuste ótimo dos parâmetros do DSSC/SSSC nesse trabalho, envolve a localização e instalação do dispositivo na rede de distribuição de energia elétrica de forma a obter a minimização do custo das perdas elétricas mais os custos

de aquisição do dispositivo, mantendo o sistema dentro de seus limites operacionais conforme (35).

Com o intuito de atingir esses objetivos, é formulado um problema de otimização combinatória a ser resolvido por um algoritmo genético. A solução envolve determinar a barra de forma eficaz onde será instalado o SSSC e realizar o ajuste de seus de seus parâmetros θ_{se} e m_{se} , com objetivo de se ter uma operação do dispositivo de forma eficiente. No processo de resolução deve-se levar em consideração os limites de tensão, correntes e etc, estipulados pelas agências reguladoras e manuais dos fabricantes.

3.2.1 Função de Aptidão

A função de aptidão é utilizada pelo AG para determinar a qualidade de um indivíduo como possível solução do problema. É por meio da função de aptidão que é atribuído o *fitness*, ou seja, um número com certo peso a cada um dos indivíduos avaliados. Quanto maior esse valor, maior a chance do indivíduo sobreviver e perpetuar seus genes para as posteriores gerações.

Nesse trabalho, as perdas ativas totais do sistema constituem uma parcela função objetivo (41), tais perdas são determinadas pelo MSP com SSSC embutido ao sistema. A outra parcela corresponde ao custo anualizado de aquisição do conversor. Dessa forma, a aptidão, ou valor *fitness* é determindo por (42).

$$fitness = D/\mathcal{F}(x) \quad (42)$$

Em que, D é uma constante para ajuste da ordem de grandeza dos valores da *fitness* e $\mathcal{F}(x)$ corresponde ao valor da função objetivo penalizada.

3.2.1.1 Método da Função de Penalidade

Segundo Silva (2016), em virtude à complexidade de solução de problemas de programação não-linear com variáveis discretas e contínuas, propõe-se um método baseado em função penalidade para o tratamento das variáveis contínuas.

Determinados métodos de função penalidade convertem um problema de programação não-linear restrito (14) em um problema irrestrito (43) (método de função de penalidade). O método consiste em adicionar as restrições à função objetivo do problema, multiplicadas por um parâmetro de penalidade, de modo a penalizar qualquer violação das restrições. Esse método gera uma sequência de soluções infactíveis até convergirem para a solução do problema restrito (14). A função

resultante da adição da função penalidade à função objetivo é denominada função auxiliar. Chama-se função auxiliar a soma entre a função penalidade à função objetivo. A função auxiliar é dada por (43).

$$\mathcal{F}(x) = f(x) + wP(x) \quad (43)$$

Sendo w o parâmetro de penalidade e $P(x)$ a função de penalidade genericamente dada por:

$$P(x) = \sum_{l \in \Omega_h} \varphi(h_l(x)) \quad (44)$$

Em que Ω_h é o conjunto das equações $h_l(x)$ que definem as restrições de desigualdade de (14). $\varphi: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, ressalta-se que φ é contínua em $h \in \mathbb{R}$, tal que:

$$\varphi(h) = \begin{cases} 0, & \text{se } h \leq 0 \\ \delta > 0, & \text{se } h > 0 \end{cases} \quad (45)$$

A função φ penaliza a violação das restrições de desigualdade de (14). A função φ tradicionalmente assume a seguinte forma:

$$\varphi(h) = (\max\{0; h\})^\beta \quad (46)$$

Em que $\beta \in \mathbb{Z}_+$. A função de penalidade é dita quadrática se $\beta = 2$. Aplicando esses conceitos ao problema especificado de (33) a (39), as restrições de tensão (35) e da corrente suportada pelo conversor (38) contribuem com o valor da função de penalidade quando $h_l(x)$ é definido como em (47), (48) e (49).

$$h_{1,i,p,j} = V^{MIN} - V_{i,p,j}, \quad \forall i \in \Omega_b, \forall j \in \Omega_t \text{ e } p = 0, 1, \text{ e } 2 \quad (47)$$

$$h_{2,i,p,j} = V_{i,p,j} - V^{MAX}, \quad \forall i \in \Omega_b, \forall j \in \Omega_t \text{ e } p = 0, 1, \text{ e } 2 \quad (48)$$

$$h_{3,i,j} = I_{CS,i,j}(V_{i-1,j}, \theta_{i-1,j}, m_{se,i,j}, \theta_{se,i,j}) - I^{MAX}, \quad \forall i \in \Omega_c \text{ e } \forall j \in \Omega_t \quad (49)$$

O valor de w é suficientemente grande possibilitando um acréscimo de valor na função objetivo. Quanto mais restrições forem violadas, mais alto fica o valor da função $\mathcal{F}(x)$ e, conseqüentemente, menor é o valor da *fitness*. Assim, aquele cromossomo com restrições excedidas é menos atrativo como solução do problema.

3.2.2 Processo de Codificação

No decorrer desse trabalho, é adotada a codificação binária por atender perfeitamente condições propostos para as variáveis de controle como em (36), (37)

e (39). Nesse tipo de representação, um cromossomo é representado por um conjunto de N bits e cada gene, por um bit. Cada cromossomo é composto por um conjunto de bits e cada subconjunto de bits representa uma variável do problema. Considerando o alimentador de N_b barras, a Tabela 01 ilustra a representação cromossomial para um SSSC sendo possível sua instalação em qualquer barra, porém em sistemas com muitas barras, é mais adequado propor um conjunto de barras candidatas, com exceção a barra de geração.

Tabela 01: Representação dos cromossos do AG

Cromossomo ($N=N_b+N_m+N_\theta$)		
SSSC		
y_i	m_{se}	θ_{se}
N_b bits	N_m bits	N_θ bits

Fonte: Própria do autor.

Dessa maneira, os N_b primeiros bits são usados para codificar as variáveis y_i definidas (39), que representa as barras candidatas para alocar o dispositivo FACTS. O bit deve ter valor 1, ou nível alto na barra onde o dispositivo está sendo alocado, e os demais bits com nível baixo (igual a 0), indicam a ausência do dispositivo.

As variáveis m_{se} e θ_{se} são contínuas, mas também são representadas por uma codificação binária. Essa estratégia leva a uma discretização dessas variáveis e, conseqüentemente, a um erro de quantização que é função da quantidade de bits utilizada na sua representação.

A precisão $\rho(N_v)$ da v -ésima variável contínuas é dada por (ARAÚJO, 2014) como em (50).

$$\rho(N_v) = \frac{L_v^{SUP} - L_v^{INF}}{2^{N_v-1}}, \quad v \in \{m_{se}, \theta_{se}\} \quad (50)$$

Em que L_v^{SUP} é o limite superior assumido pela v -ésima variável, L_v^{INF} é o limite inferior assumido pela v -ésima variável e N_v quantidade de bits usado para representar a v -ésima variável. Da Tabela 01, tem-se N_v igual à N_m , ou N_θ bits usados para representar as variáveis m_{se} e θ_{se} , respectivamente.

Para o cálculo do fluxo de potência, faz-se necessário converter em grandezas reais as variáveis codificadas na forma binária. Para as variáveis contínuas m_{se} e θ_{se} , a conversão é dada por (51).

$$v = L_v^{INF} + \rho(N_v)\mathbb{Z}_v, \quad v \in \{m_{se}, \theta_{se}\} \quad (51)$$

Em que $\mathbb{Z}_v$ é o número inteiro codificado na sequência de bits que representa o valor assumido pela variável. Na Tabela (01), a quantidade de N bits é definida para a codificação da alocação de somente um conversor considerando somente um nível de carregamento da rede de distribuição. De acordo com (38), $\dim(\mathbf{\Omega}_c)$ representa quantidade de conversores a serem alocados e $\dim(\mathbf{\Omega}_t)$ a quantidade de níveis de carregamento. Assim, a equação (52) fornece a quantidade de bits da codificação de cada indivíduo.

$$N = N_b + \dim(\mathbf{\Omega}_c) \dim(\mathbf{\Omega}_t)(N_m + N_\theta) \quad (52)$$

3.2.3 População Inicial

A forma mais simples e mais comumente utilizada na inicialização da população de um AG é por meio da geração aleatória de cada indivíduo da população, de modo que todos sejam estatisticamente independentes uns dos outros. A inicialização aleatória leva a uma boa distribuição das soluções no espaço de busca.

A dificuldade reside, de fato, na definição do tamanho da população (nP), pois o desempenho do AG é extremamente sensível a esse parâmetro. Caso o número da população seja muito pequeno, não haverá uma variedade genética suficientemente grande para explorar satisfatoriamente o espaço de busca e encontrar boas soluções. Caso contrário, o algoritmo poderá demorar demais para convergir para uma solução e, além disso, poderá estar aproximando-se muito de um método de busca exaustiva.

O tamanho adequado da população depende da quantidade de bits de cada cromossomo, do modo como são realizadas as operações de cruzamento e mutação, bem como de suas probabilidades de ocorrência e, também, da natureza da função objetivo (LINDEN, 2012). Logo, não existe um número que seja plenamente aceito para todos os problemas, ou seja, o número da população varia de acordo com o problema a ser tratado.

3.2.4 Método de Seleção

Esse operador do AG tem por finalidade selecionar os pais que dão origem aos indivíduos da geração seguinte. A seleção de pais deve simular o mecanismo de seleção natural proposto inicialmente por Charles Darwin, em que os indivíduos mais aptos têm maior probabilidade de procriar, mas, ao mesmo tempo permite que indivíduos menos aptos também gerem descendentes, porém, com menor frequência.

Ou seja, é privilegiar os indivíduos com maior aptidão (melhores) sem desprezar completamente àqueles de mais baixa aptidão (piores) (ARAÚJO, 2014).

Esta técnica se torna importante para preservar a variedade genética da população, pois até indivíduos com baixíssima avaliação podem ter características genéticas favoráveis à criação de um novo cromossomo que seja a melhor solução para o problema (ARAÚJO, 2014).

O método de seleção escolhido para esse trabalho, é o método da roleta viciada, por ser largamente usado e apresentar bons resultados. No procedimento de seleção por roleta, cada indivíduo da população é representado na roleta proporcionalmente à sua aptidão. Assim, aos indivíduos com alta aptidão é dada uma porção maior da roleta, enquanto aos de aptidão menor é dada uma porção menor da roleta. Logo a roleta é girada um determinado número de vezes, e são escolhidos os indivíduos sorteados na roleta.

3.2.5 Cruzamento (Recombinação)

Depois do processo de seleção dos pais, é dado início ao cruzamento que tem como objetivo dar origem a novos indivíduos. O cruzamento simula a reprodução sexuada das espécies por meio da troca de material genético, ou seja, é na essência a forma como os seres vivos se reproduzem.

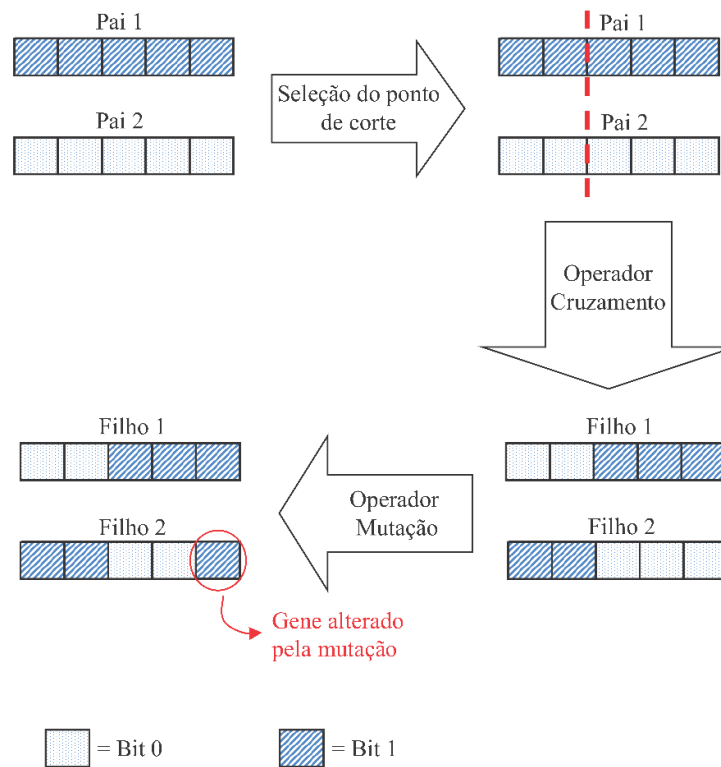
Nesse trabalho é adotado o operador cruzamento em um único ponto. No cromossomo de cada um dos pais é escolhido um ponto de corte que constitui uma posição entre dois genes consecutivos e esse ponto de corte é o ponto de separação de cada um dos genes que compõem o material genético de cada pai. Em seguida, separam-se os pais em duas partes (D, direita e E, esquerda). O primeiro filho será formado pela concatenação da parte E do pai 1 com a parte D do pai 2. O segundo, pela concatenação da parte D do pai 1 com a parte E do pai 2 (LINDEN, 2012).

3.2.6 Mutação

A mutação ocorre no processo de cruzamento dos indivíduos, e leva a conclusão de uma nova geração. Esta operação simplesmente modifica aleatoriamente alguma característica do indivíduo sobre o qual é aplicada (Figura 14). Esse processo de mutação (troca o estado do bit) é importante, pois acaba por criar novos valores de características que não existiam ou apareciam em pequena quantidade na população em análise.

O operador de mutação é necessário para a introdução e manutenção da diversidade genética da população. Desta forma, o processo de mutação assegura que a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de busca possivelmente não será zero. O operador de mutação é aplicado aos indivíduos através de uma taxa de mutação que geralmente varia de 0,5% a 5% (LINDEN, 2012).

Figura 14: Processo de cruzamento e mutação do cromossomo



Fonte: (ARAÚJO, 2014).

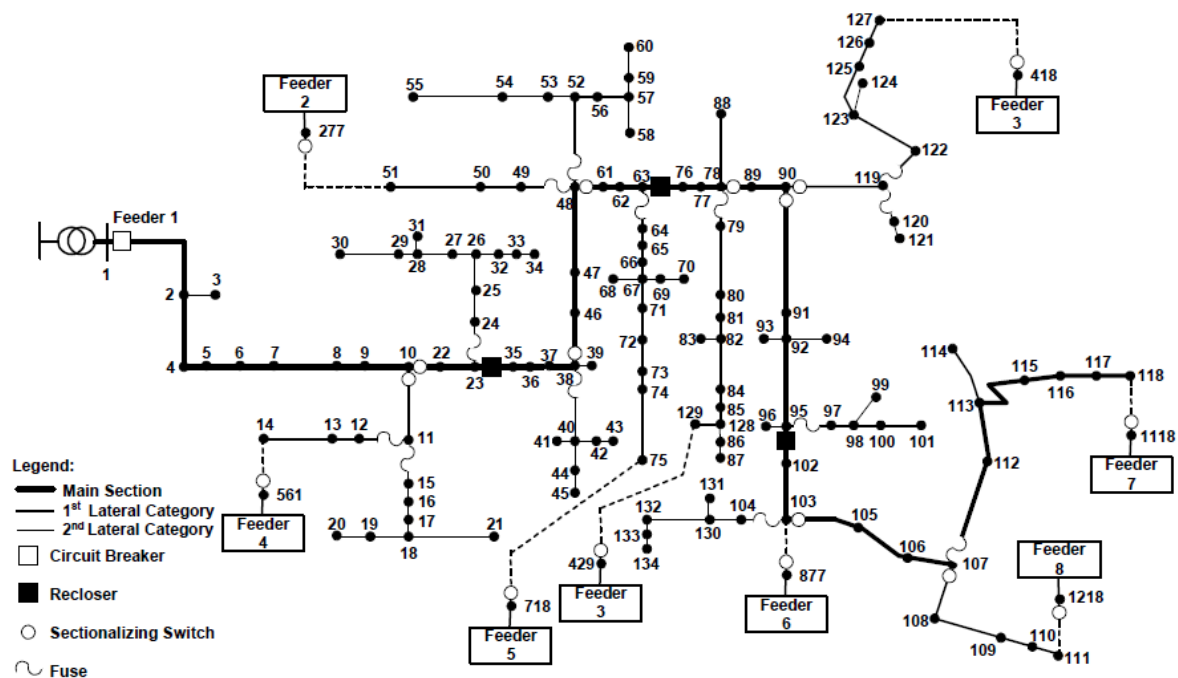
4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Primeiro, verifica-se o desempenho da expansão da formulação do MSP para resolver o problema de fluxo de potência em redes de distribuição trifásicas e desbalanceadas. Subsequentemente, os resultados do AG são analisados para o problema de alocação e ajuste ótimo do SSSC.

4.1 FLUXO DE POTÊNCIA: SISTEMA TESTE DE 135 BARRAS

O método computacional para resolver o fluxo de potência é implementado na linguagem de programação de uso geral, C#. O algoritmo implementado é então avaliado sob um sistema de distribuição de teste de 135 barras da literatura (LAPSEE, 2022) com topologia conforme apresentado na Figura 15. Trata-se de um sistema trifásico, desbalanceado e com tensão nominal de 13,8kV de linha sendo a barra de referência aquela na subestação.

Figura 15: Topologia do sistema teste de 135 barras radial para aplicações do MSP



Fonte: (LAPSEE, 2022).

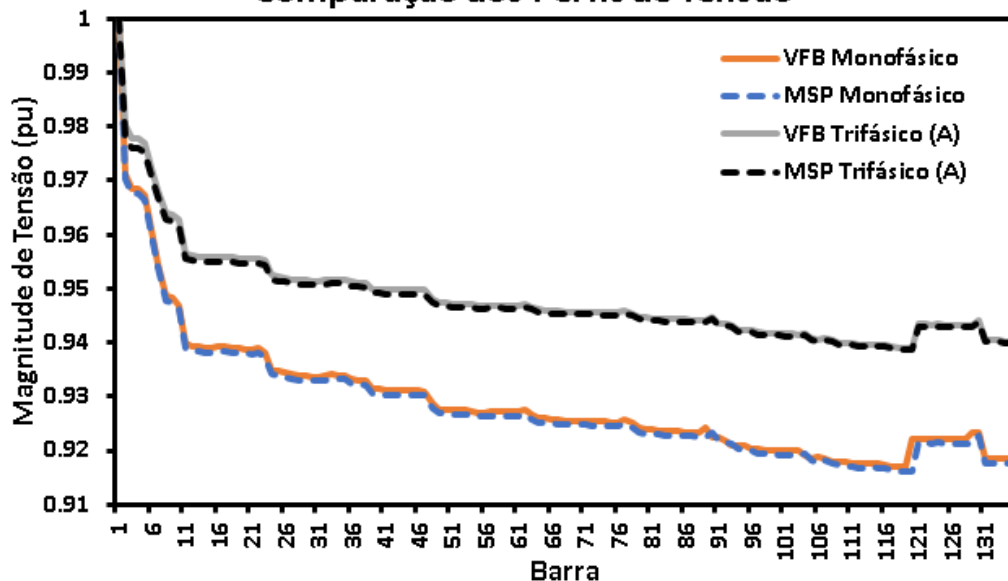
Os valores de tensão calculados pelo MSP são comparados com os resultados obtidos usando o algoritmo de varredura de *forward/backward* (GIRARDI; LEITE, 2021) bastante conhecido pela comunidade especializada para o cálculo do fluxo de potência. A análise numérica é, então, realizada em dois casos comparativos de estudo. No primeiro, verifica-se a precisão do MSP em relação ao método de referência no cálculo de um fluxo de potência monofásico e outro trifásico. No

segundo, somente o fluxo de potência trifásico é calculado para diferentes condições de desbalanceamento de carga, variando de 0% a 80% de desequilíbrio entre as fases.

4.1.1 Caso I: Fluxo Monofásico e Trifásico

A Figura 16 apresenta os perfis de tensão para o sistema teste na fase a obtidos usando o algoritmo de varredura *forward/backward* (VFB) de soma de correntes, e MSP. A não consideração do acoplamento magnético, formulação monofásica, leva a um perfil de tensão com valores menores quando comparados aos obtidos pela formulação trifásica. Em ambas as condições, monofásico e trifásico, os gráficos de linha representando os resultados do VFB e MSP estão sobrepostos indicando a similaridade dos valores calculados.

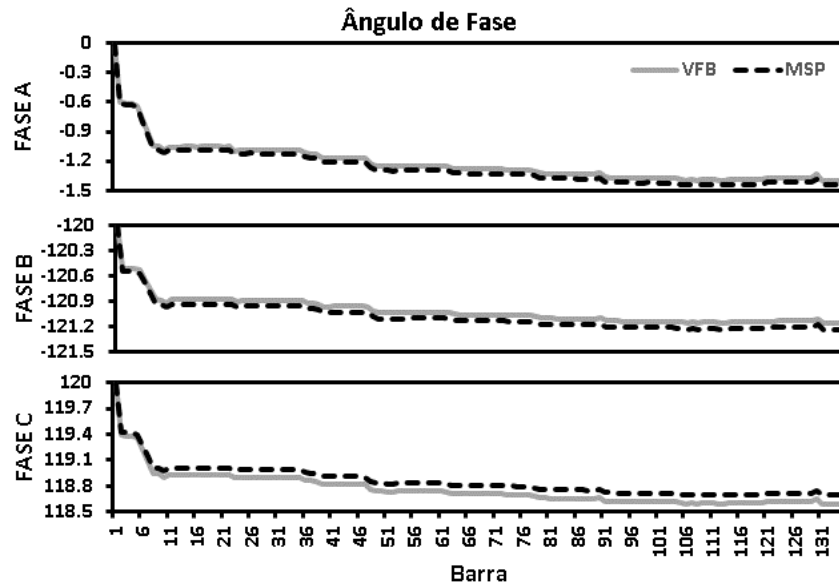
Figura 16: Perfis de tensão para o sistema teste na fase a
Comparação dos Perfis de Tensão



Fonte: Própria do Autor.

Como o MSP convencional é reconhecidamente eficiente na resolução do fluxo de potência monofásico, é somente verificado a diferença numérica para o trifásico. Assumindo o VFB trifásico como a referência, a diferença absoluta média das magnitudes de tensão é $5,8257 \times 10^{-4}$ pu. Em adição, a Figura 17 demonstra uma comparação entre os ângulos de fase das tensões nodais obtidos pelo algoritmo VFB e MSP trifásico proposto.

Figura 17: Comparação entre os ângulos das tensões nodais trifásicas



Fonte: Própria Autor

Em uma análise qualitativa dos gráficos de linha, verifica-se uma sobreposição nos ângulos das tensões nodais para a fase a. Na fase b, os ângulos obtidos pelo algoritmo VFB são ligeiramente maiores que aqueles obtidos pelo MSP trifásico. Na fase c, o oposto é verificado, os ângulos obtidos pelo MSP trifásico são ligeiramente maiores. Em termos quantitativos, as médias das diferenças absolutas para os ângulos das tensões nodais são $0,0421^\circ$, $0,0689^\circ$ e $0,0893^\circ$ para as fases a, b e c, respectivamente. A precisão no cálculo dos ângulos de fase é um pouco menor, pois essas grandezas são calculadas usando os valores das magnitudes de tensão acumulando, assim, a pequena imprecisão do MSP trifásico proposto.

4.1.2 Caso II: Carga Desbalanceada

Na primeira coluna da Tabela 02 é apresentado o máximo desbalanço percentual das cargas. No caso base, as cargas são equilibradas, i.e. desbalanço de 0%. Um desbalanço máximo de 10%, por exemplo, indica uma carga na fase a é 5% maior que na fase b e 10% maior que na fase c. As métricas incluem o erro médio percentual da magnitude de tensão, μ_V , o desvio médio do erro, σ_V , e o máximo erro percentual, $Max(\delta_V)$, calculados usando os resultados do algoritmo de VFB como referência. Em adição, para as magnitudes de referência é calculado o fator de desequilíbrio de tensão, $FD\%$, através de (53), como definido pela ANEEL no módulo 8 dos procedimentos de distribuição (ANEEL, 2022).

$$FD\% = (V_-/V_+) \times 100 \quad (53)$$

Em que V_- é a magnitude da tensão eficaz de sequência negativa e V_+ é de sequência positiva.

Tabela 02: Desempenho do MSP trifásico

Desbalanço	Valor das Métricas		FD
Base (0%)	μ_V	0,3482%	0,2551%
	σ_V	0,0238%	
	$Max(\delta_V)$	0,3844%	
10%	μ_V	0,3177%	0,3948%
	σ_V	0,0063%	
	$Max(\delta_V)$	0,3253%	
20%	μ_V	0,3166%	0,9808%
	σ_V	0,0063%	
	$Max(\delta_V)$	0,3243%	
40%	μ_V	0,5893%	2,1559%
	σ_V	0,0618%	
	$Max(\delta_V)$	0,6735%	
80%	μ_V	1,4901%	4,4600%
	σ_V	0,1722%	
	$Max(\delta_V)$	1,7251%	

Fonte: Própria do Autor.

Para carga equilibrada, o fator de desequilíbrio é de 0,2551% decorrente do desbalanceamento da rede de distribuição. As impedâncias mútuas entre as fases são diferentes devido a disposição geométrica dos condutores. O erro médio é de 0,3482% bem próximo do máximo erro de 0,3844%. Até 20% de desequilíbrio o erro médio está próximo de 0,3% indicando a capacidade do MSP trifásico em obter resultados precisos independente do desbalanço de carga.

O erro percentual médio aumenta para os casos de 40% e 80% de desequilíbrio e atinge, respectivamente os valores de 0,5893% e 1,4901%. Esses dois casos representam pontos de operação fora dos limites operacionais estabelecidos pela ANEEL, pois o máximo valor do fator de desequilíbrio de tensão para o nível de 13,8 kV é de 2,0%. De fato, a expansão da formulação do MSP trifásicas é capaz de obter com boa precisão as magnitudes de tensão nodais trifásicas mesmo em condições de desbalanceamento, que é uma característica das redes de distribuição.

Portanto, a expansão da equação biquadrada do MSP preserva sua forma e permite o cálculo do módulo das tensões trifásicas nodais, i.e. do vetor coluna com as magnitudes de tensão para cada fase. A proposta dá suporte às redes de distribuição que são trifásicas e desbalanceadas. Para o limite operacional de desequilíbrio de tensão estabelecido pela ANEEL, o MSP trifásico é eficaz na solução do fluxo de potência com baixo erro percentual médio.

4.2 ALGORITMO GENÉTICO: ALOCAÇÃO E AJUSTE DO SSSC

O algoritmo genético proposto para resolução do problema de alocação e ajuste ótimo do SSSC/DSSC foi implementado na linguagem de programação de uso geral, C#, fazendo uso do *software* Visual Studio®. Os limites operacionais das variáveis de estado e controle são apresentadas na Tabela 03. Em relação aos limites de tensão e em concordância com o módulo 08 (oito) do procedimento de distribuição (PRODIST), a faixa adequada de tensões superiores à 1 kV e inferiores à 69 kV devem estar situados entre 93% e 105% dos valores nominais (ANEEL, 2022).

Tabela 03: Limites operacionais

Limites	Valor
$V^{MIN}(pu)$	0,93
$V^{MAX}(pu)$	1,05
m_{se}^{MIN}	0
m_{se}^{MAX}	0,5
θ_{se}^{MIN}	0
θ_{se}^{MAX}	2π
I^{MAX}	1

Fonte: Própria do Autor.

Sendo o AG um método probabilístico, chega-se a um valor que não necessariamente é um ótimo global, por isso, uma prática usual com esse tipo de algoritmo é executar o programa diversas vezes e salvar o melhor resultado como é mostrado em gráficos posteriores (Kirkpatrick; Gelatt; Vecchi, 1983). Neste trabalho, foi executado o algoritmo 10 vezes para cada caso e foi salvo o melhor resultado para a função objetivo.

Adicionalmente ao alimentador de 135 barras, mostrado na Figura 15, a Tabela 04 exemplifica a representação cromossomal para a alocação de um SSSC nos alimentadores de 17 e 33 barras considerando somente um nível de carregamento.

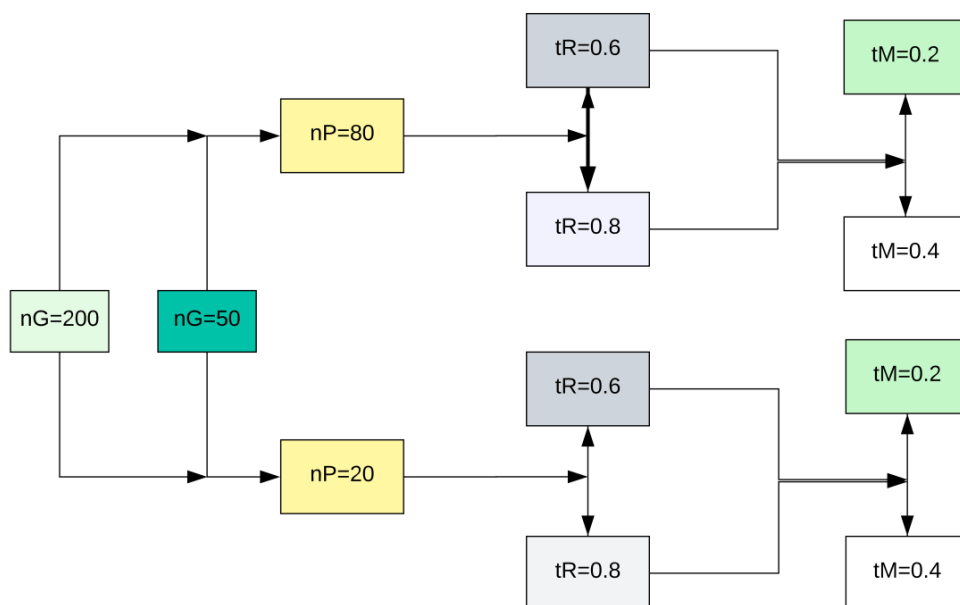
Tabela 04: Formato da codificação do cromossomos do AG

17 BARRAS		
SSSC		
Barras	m_{se}	θ_{se}
17 bits	5 bits	8 bits
33 BARRAS		
SSSC		
Barras	m_{se}	θ_{se}
33 bits	5 bits	8 bits
135 BARRAS		
SSSC		
Barras	m_{se}	θ_{se}
135 bits	5 bits	8 bits

Fonte: Própria do Autor.

Para cada um dos alimentadores, com codificação conforme a Tabela 04, são realizadas combinação, para dois valores de ajuste, dos parâmetros de ajuste do AG. A Figura 18 ilustra a árvore geradora dessas combinações. Sendo nG a quantidade de gerações, nP o tamanho da população, tR é a taxa de recombinação entre os indivíduos e tM é a taxa de mutação dos bits dos indivíduos.

Figura 18: Combinações possíveis dos parâmetros



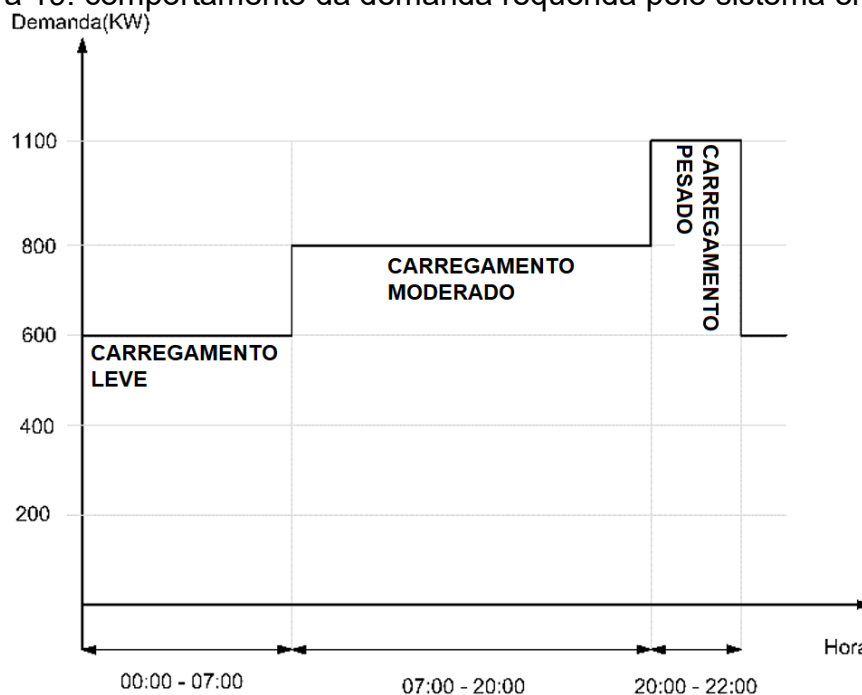
Fonte: Própria do Autor.

4.2.1 Curva de Operação da Demanda do Sistema

Níveis de demanda, ou simplesmente demanda em uma instalação elétrica é a carga nos terminais receptores tomada em valor médio em um determinado intervalo de tempo. Entende-se por carga, a aplicação que está sendo medida em termos de potência (ativa, reativa, aparente), ou em termos de valor eficaz da intensidade de corrente.

Geralmente esse valor de demanda é mensurado a cada 15 minutos, porém em neste estudo opta-se por trabalhar apenas com 03 (três) níveis de demanda no decorrer das 24h diárias, sendo: carregamento leve; carregamento moderado e carregamento pesado, como mostrado na Figura 19. O intuito de usar todos os carregamentos, consiste em provar a eficiência de operação do dispositivo em diferentes níveis de carregamento do sistema o qual o mesmo possa ser instalado.

Figura 19: comportamento da demanda requerida pelo sistema em 24 horas



Fonte: (SILVA, 2016) adaptado.

Os percentuais de demanda atribuídos para o sistema trifásico (135 barras), considerando os níveis de carregamento leve, moderado e pesado, respectivamente, foram: 50%, 100% e 200%. Enquanto os percentuais atribuídos para os sistemas monofásicos, 17 barras e 33 barras, considerando os níveis de carregamento leve, moderado e pesado respectivamente, foram: 25%, 50% e 100%. Os intervalos de tempos em que cada percentual ocorre, está bem definido na Figura 19 que representa um dia típico de um ano de 365 dias.

4.2.2 Análise da Alocação e Ajuste do SSSC

Nas simulações com o SSSC são adotados 02 (dois) tamanhos de gerações e população (Figura 18). Os melhores resultados obtidos para cada sistema teste são apresentados nas Tabelas 05, 07 e 08.

Tabela 05: Valores dos parâmetros do SSSC

Rede	SSSC	Barra	Leve		Moderado		Pesado	
			m_{se}	$\theta_{se}(rad)$	m_{se}	$\theta_{se}(rad)$	m_{se}	$\theta_{se}(rad)$
17	1	05	0,1935	1,3059	0,0806	0,0739	0,2580	1,1827
33	1	05	0,2903	1,4537	0,1290	0,1971	0,2580	5,9135
135	1	02	0,0483	6,1846	0,0806	5,7903	0,2419	4,9033
	2	08	0,0645	1,3798	0,0645	0,8377	0,3709	4,7308
		63	0,0967	1,0841	0,0967	5,0511	0,1935	1,4291

Fonte: Própria do Autor.

A tabela 05 atende perfeitamente os intervalos apresentados para m_{se} e $\theta_{se}(rad)$ na Tabela 03. A segunda coluna na Tabela 05, apresenta a quantidade de conversores e a terceira coluna a barra a qual o conversor é instalado ao longo dos sistemas propostos.

Tabela 06: Valores mínimos e máximos das magnitudes de tensão

Rede	SSSC	Leve		Moderado		Pesado	
		V_{min}	V_{max}	V_{min}	V_{max}	V_{min}	V_{max}
17	1	0,9991	1,0253	0,9942	0,9982	0,9366	0,9963
33	1	0,9978	1,0108	0,9954	1,0177	0,9900	1,0506
135	1	1,0217	1,0390	1,0150	1,0500	0,9485	1,0253
	2	1,0045	1,0363	1,0251	1,0262	0,9969	1,0256

Fonte: Própria do Autor.

A Tabela 06 apresenta os valores mínimos e máximos das magnitudes de tensão para as soluções obtidas pelo AG, observa-se que os resultados das tensões mostradas estão de acordo com os intervalos apresentados na Tabela 03, além do mais, as maiores taxas de variações de tensões ocorrem no carregamento pesado. Tal justificativa se dá em virtude da elevada queda de tensão ao longo da rede de distribuição. Com maiores fluxos de potência nas linhas, maiores são as perdas de potência.

Tabela 07: Custos totais e das perdas ativas para os sistemas de teste

Rede	SSSC	Custo Total	Custo das Perdas Ativas	
			Base	AG
17	1	2.439.046,07	321.771,67	239.044,98
33	1	3.394.870,53	1.609.098,70	1.393.681,26
135	1	4.136.595,44	2.257.711,43	1.905.884,69
	2	6.180.809,46	2.257.711,43	1.779.621,31

Fonte: Própria do Autor.

A tabela 07 apresenta os custos totais das soluções encontradas pelo AG e compara com os custos do caso base quando não há alocação dos conversores. Os custos apresentados são diretamente proporcionais ao número de FACTS alocados no sistema.

Tabela 08: Perdas ativas totais (kWh/ano)

Rede	SSSC	Leve		Moderado		Pesado	
		Base	AG	Base	AG	Base	AG
17	1	29.504,87	25.918,61	183.621,86	122.454,93	136.625,09	111.457,96
33	1	123.321,97	112.671,97	810.745,20	747.358,92	814.953,16	654.840,04
135	1	213.150,38	199.675,25	1.305.532,27	1.109.702,42	935.351,51	762.236,12
135	2	213.150,38	136.297,96	1.305.532,27	1.042.212,09	935.351,51	755.860,95

Fonte: Própria do Autor

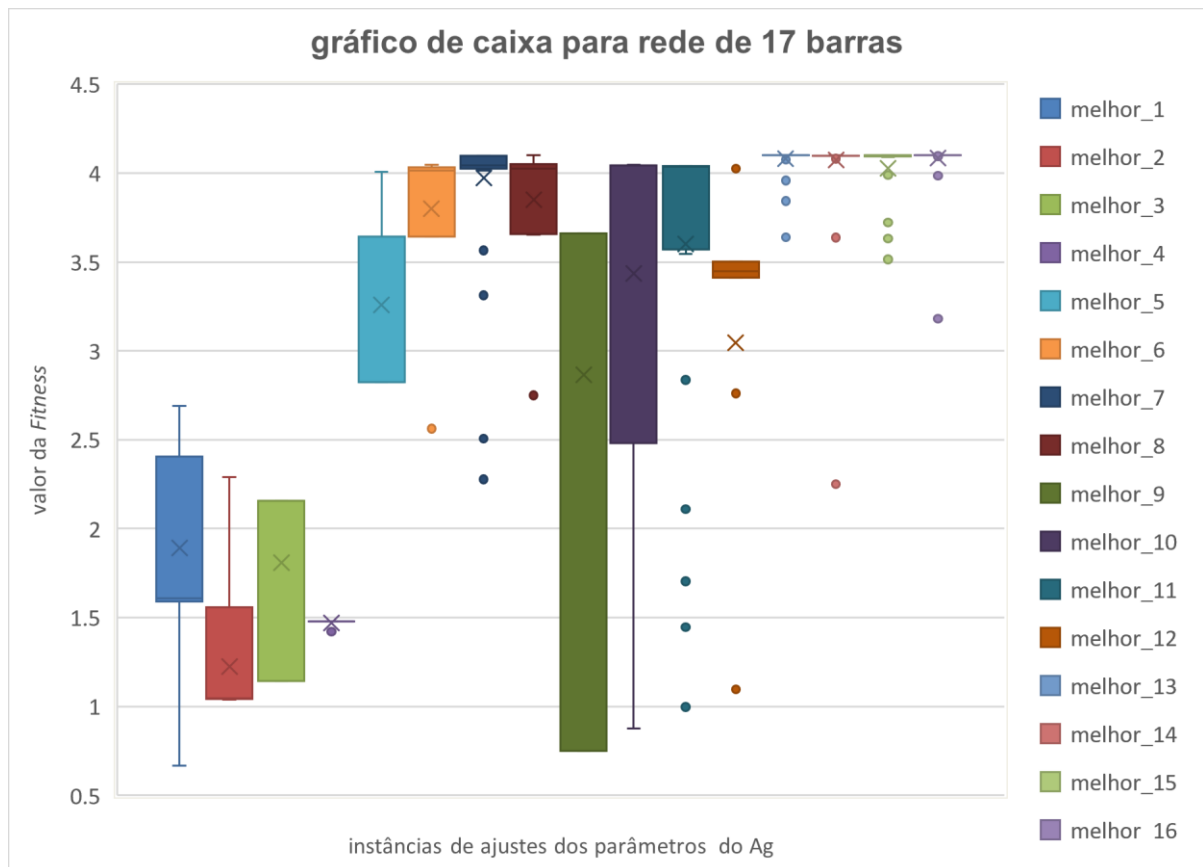
A tabela 08, tem por objetivo apresentar os valores das perdas ativas totais ao longo do sistema considerado em questão, com o FACTS instalado e o valor das perdas antes da instalação do dispositivo, ou seja no caso base. Houve uma redução significativa das perdas totais após a instalação dos dispositivos, isso nos remete a uma comprovação da eficiência do SSSC ao longo dos sistemas tratados. Para a rede de 17 barras há uma redução de 25,71% nas perdas totais, na rede de 33 barras a redução é de 13,39%, na rede de 135 barras as reduções são de 15,58% e 21,18% considerando a instalação de um e dois SSSCs, respectivamente. Embora a redução nas perdas seja maior ao instalar mais de um conversor na rede 135 barras, o custo total é ainda bastante elevado pois a tecnologia em questão não é barata (R\$), representando um fator limitante para sua utilização.

4.2.3 Análise do Algoritmo Genético

O *boxplot* é um recurso gráfico usado regularmente na pesquisa científica para sumarizar e analisar dados quantitativos. Tem como objetivo descrever didaticamente a estrutura, interpretação, construção, modificações e aplicações deste recurso visual. O *boxplot* tradicional exibe medidas de tendência central não-paramétrica (mediana), de dispersão (quartis), forma de distribuição ou simetria da amostra (valores pontuais mínimo e máximo), valores atípicos (*outliers*) e extremos. Modificações podem ser incorporadas para possibilitar a inserção de parâmetros como média, desvio padrão e intervalo de confiança. As aplicações incluem análise exploratória dos dados, detecção de *outliers* e comparação entre grupos (equivalência) (Neto *et al.*, 2017)

No problema de alocação e ajuste do SSSC nos sistemas de 17, 33 e 135 barras, os gráficos apresentados nas Figuras 20 a 25 tem por objetivo justificar ao leitor qual a combinação dos parâmetros que melhor se adequou ao propósito desse trabalho, dentre às 16 combinações possíveis (Figura 19).

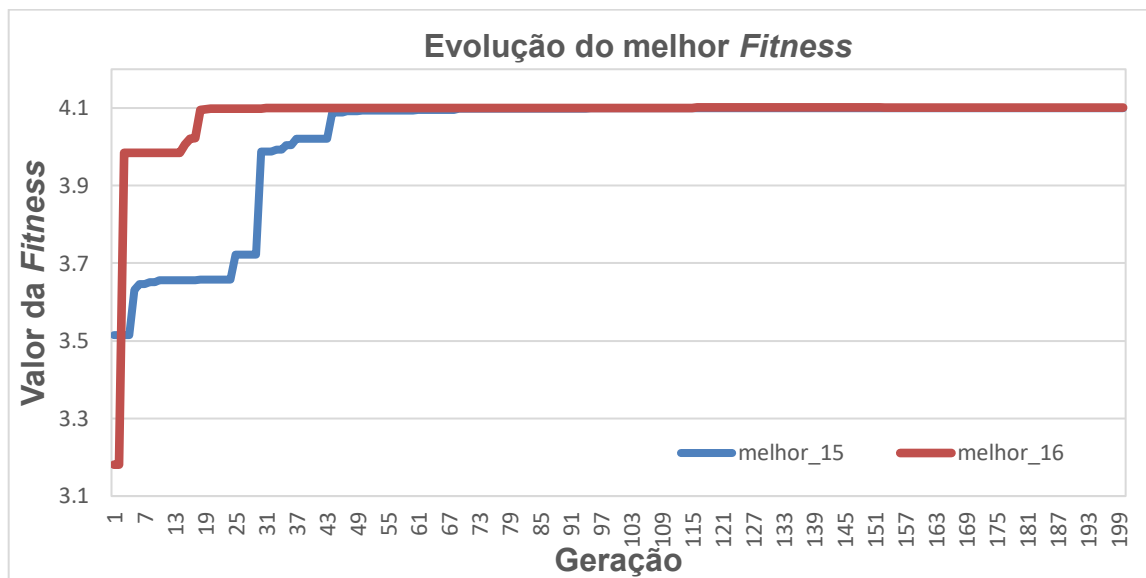
Figura 20: *Fitness* gerados pelas combinações dos parâmetros do AG no sistema de 17 barras (1 SSSC)



Fonte: Própria do Autor.

Observa-se na Figura 20 que o melhor *fitness* é atingido em 05 das 16 instâncias de ajuste dos parâmetros do AG. Porém, há aquelas instâncias que apresentam uma menor diversidade das soluções, como no *boxplot* 16 (esquerda para direita) que possui um menor desvio padrão. Na Figura 21 é mostrado o comportamento dos *fitness* gerados pelos casos do *boxplot* 16 e 10. As Figuras 20 e 21 são geradas usando o sistema de 17 barras.

Figura 21 - Comportamento do *fitness* nos ciclos geracionais para 17 barras (1 SSSC)



Fonte: Própria do Autor.

Tabela 09 - Parâmetros do AG para os casos do *boxplot* 15 e 16.

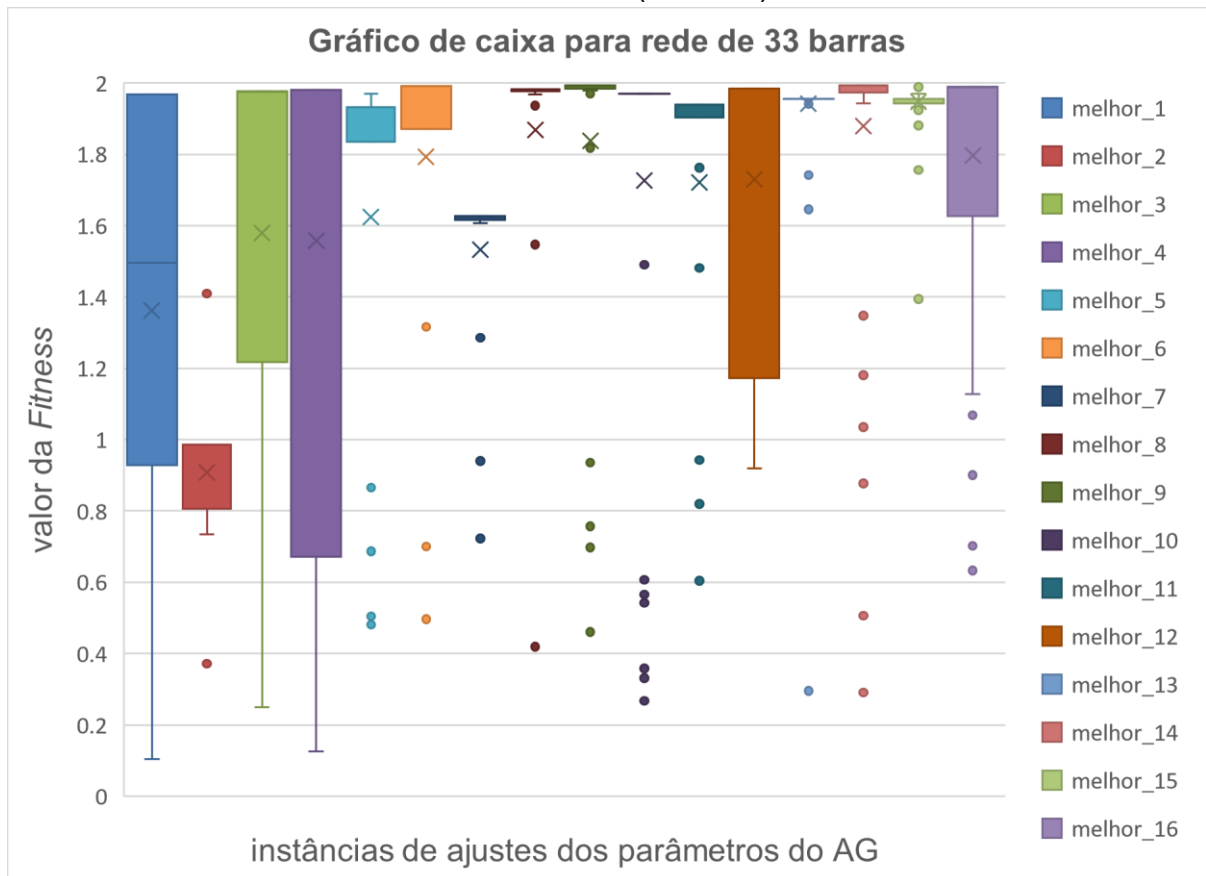
nG=200, geração tem tamanho 200;	nG=200, geração tem tamanho 200;
nP=20, população tem tamanho 20;	nP=80, população tem tamanho 80;
Tr=0,6, taxa de recombinação é 60%;	Tr=0,8, taxa de recombinação é 80%;
Tm=0,4, taxa de mutação é 40%;	Tm=0,4, taxa de mutação é 40%;

Fonte: Própria do autor

Na tabela 09, os valores dos parâmetros da primeira coluna correspondem ao ajuste da instância para o “melhor_15”, enquanto os valores da segunda coluna são para o “melhor_16”. De acordo com a Figura 21, o valor da *fitness* para o “melhor_15” demora mais para convergir a uma solução factível, quando comparado ao melhor_16.

Uma análise similar pode ser realizada para os resultados obtidos usando os sistemas de teste com 33 e 135 barras. A Figura 22 mostra os diagramas de caixa para o sistema de 33 barras.

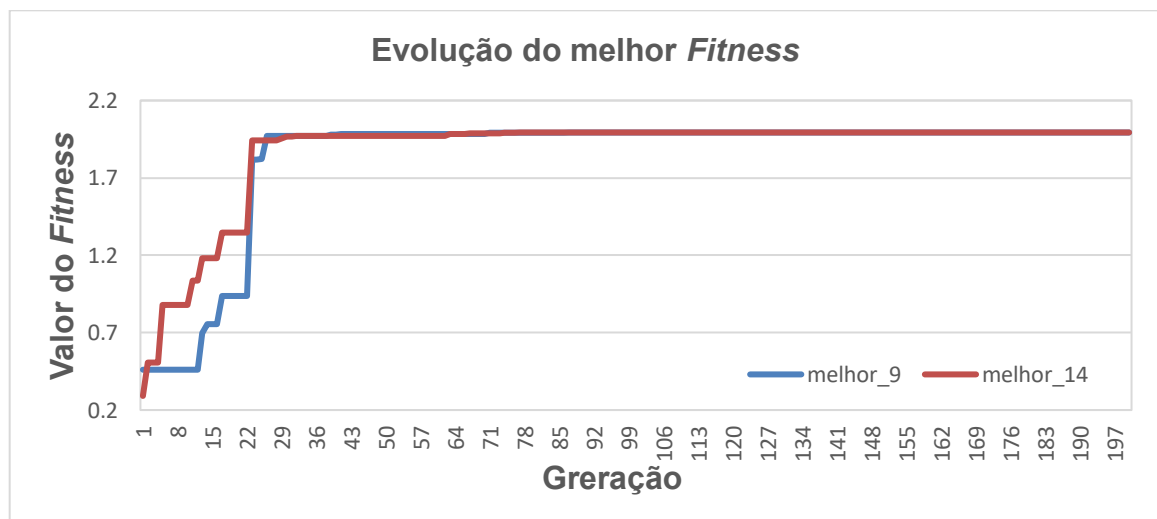
Figura 22 - *Fitness* gerados pelas combinações dos parâmetros do AG no sistema de 33 barras (1 SSSC)



Fonte: Própria do Autor.

Na Figura 22 percebe-se que a instância melhor_09 tem menor diversidade genética que a melhor_14, mas ambas terminam os ciclos geracionais com *fitness* iguais. A Figura 23 apresenta a evolução da *fitness*.

Figura 23: Comportamento do *fitness* nos ciclos geracionais para 33 barras

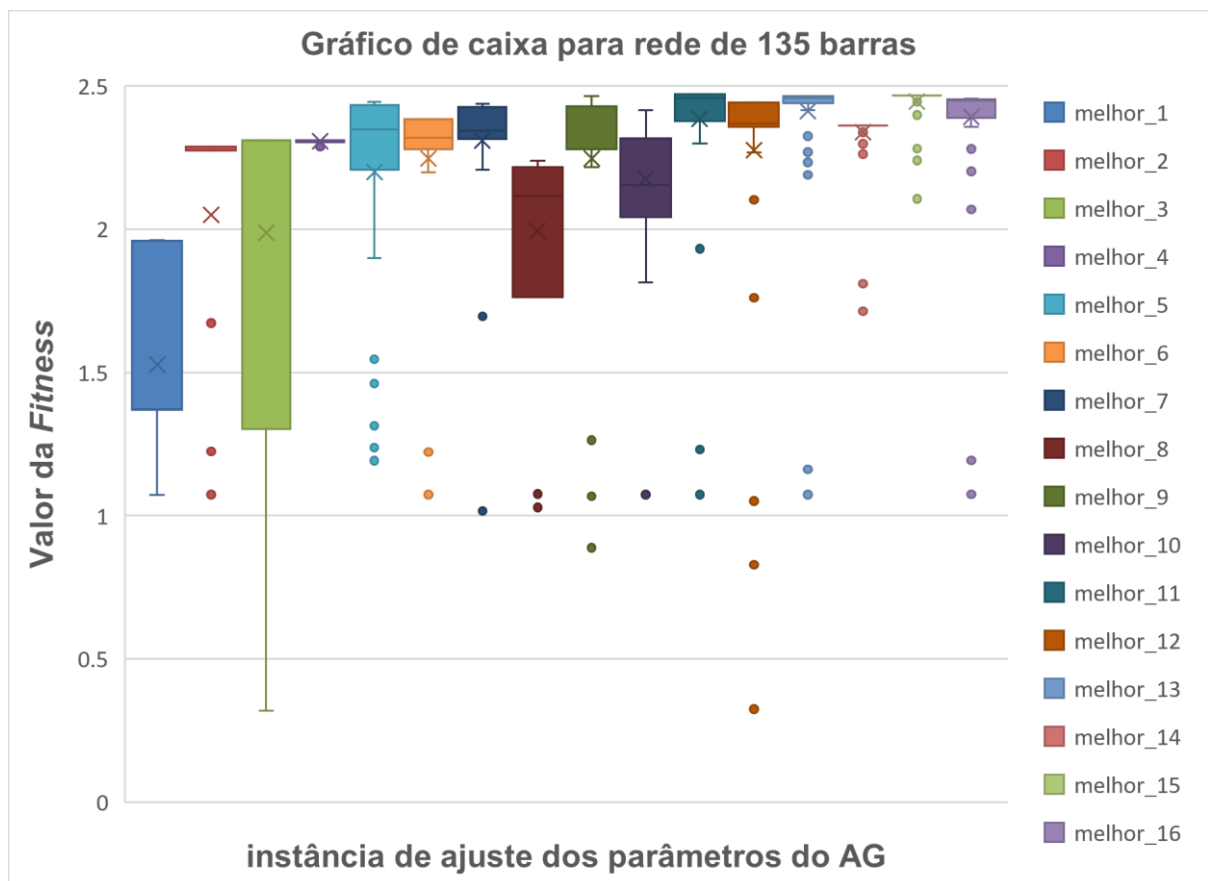


Fonte: Própria do Autor

Tabela 10 – Parâmetros do AG para as instâncias melhor_09 e _14.

nG=200, geração tem tamanho 200;	nG=200, geração tem tamanho 200;
nP=20, população tem tamanho 20;	nP=20, população tem tamanho 20;
Tr=0,6, taxa de recombinação é 60%;	Tr=0,8, taxa de recombinação é 80%;
Tm=0,4, taxa de mutação é 40%;	Tm=0,2, taxa de mutação é 20%;

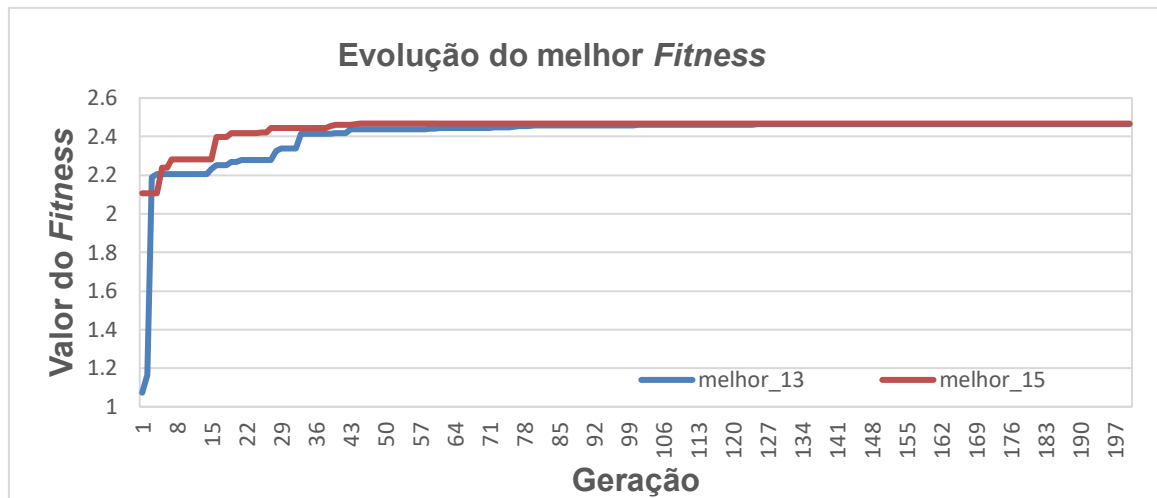
Fonte: Própria do Autor.

Figura 24: *Fitness* gerados pelas combinações dos parâmetros do AG no sistema de 135 barras (1 SSSC)

Fonte: Própria do Autor.

Observando a Figura 24 pode-se perceber que a instância melhor_13 tem menor diversidade genética que a melhor_15, mas ambas terminam os ciclos geracionais com fitness iguais. A Figura 25 apresenta a evolução da fitness em tais ciclos geracionais.

Figura 25: Comportamento do *fitness* nos ciclos geracionais para 135 barras (1 SSSC)



Fonte: Própria do Autor.

Tabela 11 - Parâmetros do AG para as instâncias melhor_13 e _15

nG=200, geração tem tamanho 200;	nG=200, geração tem tamanho 200;
nP=80, população tem tamanho 80;	nP=20, população tem tamanho 20;
Tr=0,8, taxa de recombinação é 80%;	Tr=0,8, taxa de recombinação é 80%;
Tm=0,2, taxa de mutação é 20%;	Tm=0,4, taxa de mutação é 40%;

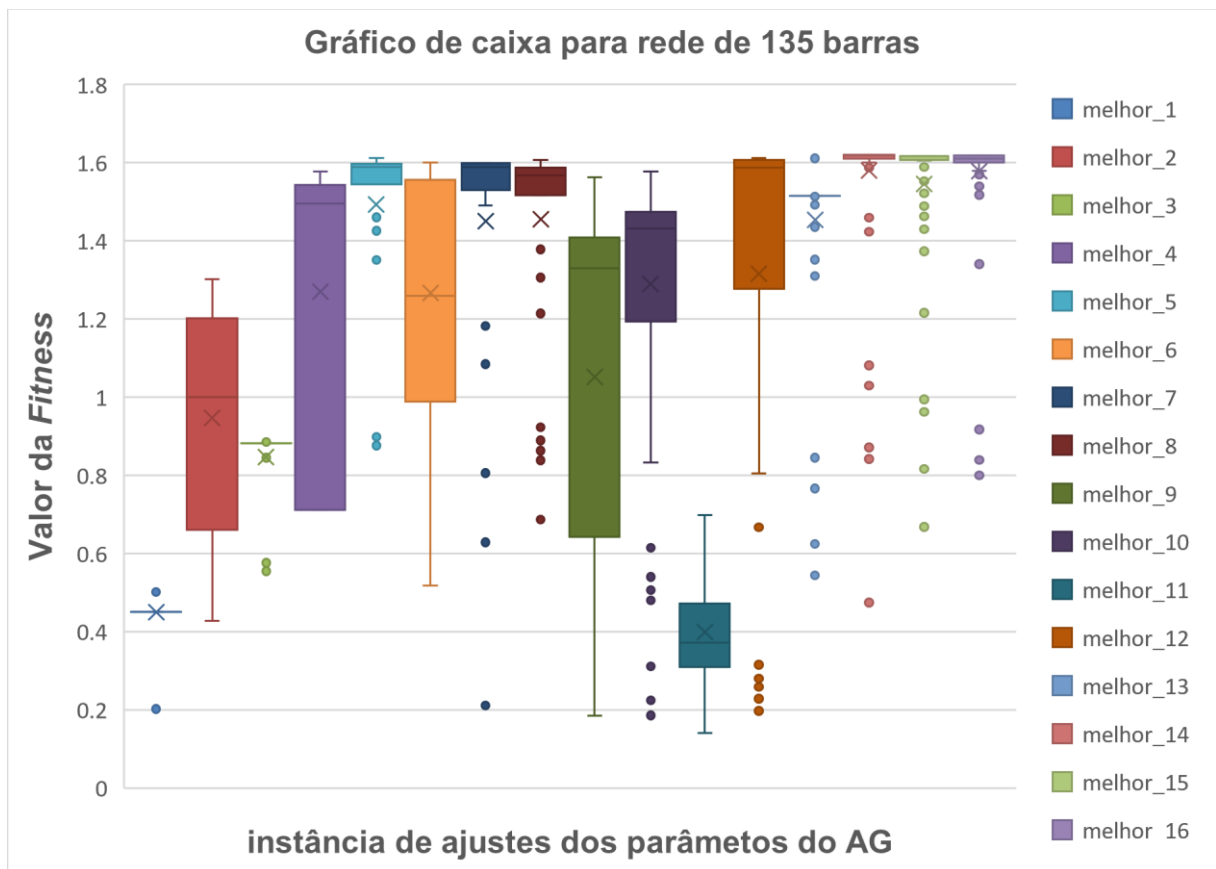
Fonte: Própria do Autor

A Tabela 11 mostra que a única diferença de ajuste para geração das instância melhor_13 e melhor_15 é a taxa de mutação. Embora a população inicial da instância melhor_15 tenha sido de baixa qualidade, os operadores genéticos possibilitaram a evolução do *fitness* até o valor obtido pela instância do melhor_13 que tem uma população inicial de boa qualidade.

Comparando o valor das *fitness* das Figuras 24 e Figura 26, observa-se que o valor da Figura 26 é menor que o valor da Figura 24, isso se dá em virtude do aumento do número de dispositivos FACTS alocados no sistema, consequentemente houve uma maior redução de perdas.

Observando a Figura 26 pode-se perceber que a instância melhor_14 tem menor diversidade genética que a melhor_16, mas ambas terminam os ciclos geracionais com *fitness* iguais. A Figura 27 apresenta a evolução da *fitness* em tais ciclos geracionais.

Figura 26 - *Fitness* gerados pelas combinações dos parâmetros do AG no sistema de 135 barras (2 SSSCs).



Fonte: própria do autor.

Figura 27: Comportamento do *fitness* nos ciclos geracionais para 135 barras (2 SSSCs)



Fonte: própria do autor.

Tabela 12: Parâmetros do AG para as instâncias melhor_14 e _16

nG=200, geração tem tamanho 200;	nG=200, geração tem tamanho 200;
nP=20, população tem tamanho 20;	nP=20, população tem tamanho 20;
Tr=0,6, taxa de recombinação é 60%;	Tr=0,8, taxa de recombinação é 80%;
Tm=0,4, taxa de mutação é 40%;	Tm=0,2, taxa de mutação é 20%;

Fonte: Própria do Autor.

Os resultados mostrados confirmam a eficiência do algoritmo genético na solução de problemas dessa natureza, além do mais, as equações do fluxo de potência trifásico aplicado ao MSP, se mostraram eficientes no processo de otimização abordado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Os desenvolvimentos realizados permitem a solução básica de alocação e ajuste dos parâmetros do SSSC, que possui modelo matemático similar ao DSSC, em redes de distribuição de energia elétrica.

No decorrer desse trabalho foi possível realizar comparações do sistema operando com dispositivos alocados e não alocados, e por meio dessas comparações, foi possível concluir a eficiência do SSSC/DSSC na atenuação de perdas ativas no sistema a qual o mesmo está inserido.

A expansão do métodos de soma das potencias do sistema monofásico para o sistema trifásico, ocorreu com bastante eficiência, comprovando que a expansão do equacionamento está correto, além do mais o algoritmo genético operou com bastante eficiência no objetivo central desse trabalho que é a alocação do SSSC/DSSC no sistema de distribuição de energia elétrica, com o intuito de minimização de perdas ativas, além das regulações dos parâmetros do dispositivo, o qual se deu de forma bastante satisfatória.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Os próximos passos da pesquisa consistem em:

- ✓ Fazer a locação dos FACTS e regulação dos parâmetros em um sistema contendo geração distribuída;
- ✓ Fazer uma expansão para avaliar não apenas as perdas, mas também os custos em termos de geração;
- ✓ Fazer uma modelagem matemática que contemple particularidades do sistema de distribuição de energia elétrica, tais como a relação R/X , condições de curto circuito na rede em que o FACTS estiver operando;

BIBLIOGRAFIA

H. Akagi, H. Kanazawa and Y. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components," V. IA-20, n. 3, p.625-630, 1984, disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4504460> acessado em: 01 de jul. 2022.

ANEEL, A. N. D. E. E. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. **Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, Revisão 13ª**. disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf acessado em: 01 de jul. 2022.

ARAUJO, L. R. D. **Uma Contribuição ao Fluxo de Potência Ótimo Aplicado a Sistemas de Potência Trifásicos usando o Método dos Pontos Interiores**. 2005. 295 f. tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)- universidade federal do rio de janeiro, Rio De Janeiro, 2005.

ARAÚJO, R. D. **Alocação e Ajuste ótimos de Dispositivos FACTS em Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Algoritmos Génético**. 2014. 102 f. dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- universidade federal de sergipe, Aracaju, 2014.

BARAN, M.; WU, F. "Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system", v.4, n.1, p.735-746, 1989, disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/19266> acesso em: 02 de jul. de 2022.

BRIGATTO, G. A. A. E. A. Uma contribuição ao estudo do fluxo de potência em redes de distribuição com inserção de unidades de geração distribuída pelo método da soma de potências modificado. p.1-7, 2010. Buenos Aires, Argentina.

CHEN, T. H. et al. Distribution system power flow analysis-a rigid approach. v.6, n.3, p.1146-1152, 1991, disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/85860> acessado em: 03 de jul. de 2022.

CHENG, C. S.; SHIRMOHAMMADI, D. A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis. v.10, n. 2, p. 671-679, 1995, disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/387902>, acessado em: 03 de jul. de 2022.

DIVAN, D.; JOHAL, H. Distributed FACTS A New Concept for Realizing Grid Power Flow Control. v.22, n.6, p.2253–2260, 2007, disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4371538>, acessado em: 06 de jul. de 2022

DIXON, R. et al. Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review, v.93, n.12, p.2144-2164, 2005, disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1545768> acessado em 06 de jul. de 2022.

DUGAN, R. C.; MCDERMOTT, E. An open source platform for collaborating on smart grid research, p.1-7, 2011, disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6039829?arnumber=6039829> acessado em: 07 de jul. de 2022.

FALCÃO, D. M. **Fluxo de Potência em Redes de Distribuição Radiais**. COPPE-UFRJ, 2003.

FARIAS, C. M. D. **Alocação Ótima de Equipamentos FACTS em Sistemas de Potência Através de Algoritmos Genéticos Multiobjetivos**. 2010. 165 f. dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- universidade federal de florianópolis, Florianópolis, 2010.

FILHO, S. A. **Análise de Controladores Eletrônicos em Sistemas de Distribuição de Energia**. 2005. 195 f. dissertação (Mestrado em engenharia Elétrica)- universidade estadual paulista, Ilha Solteira, 2005.

FORTES, E. D. V. *et al.* Modelo Matemático para Fluxo de Potência Ótimo Considerando o FACTS Interline Power Flow Controller. in: VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Natal, 2016.

GANDOMAN, F. H. *et al.* *Review of FACTS technologies and applications for power quality in smart grids with renewable energy systems*, V.82, n.13, p. 502-514, 2018, disponível em: <https://researchportal.vub.be/en/publications/review-of-facts-technologies-and-applications-for-power-quality-i> acessado em: 06 de jul. de 2022.

GIRARDI, M. F.; LEITE, J. B. Performance Analysis of Three-Phase Power Flow Algorithms in Power Distribution Networks, p.12-15, 2021, disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9647047> acessado em 08 de jul. de 2022.

GYUGYI, L.; SEN, ; SCHAUDERR, D. The interline power flow controller concept: a new approach to power flow management in transmission systems, v.14, n. 3, p.1115-1123, 1999, disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/772382>, acessado em: 08 de jul. de 2022.

HAMIDI, A.; GOLSHANNAVAZ, S. e NAZARPOUR, D. *D-FACTS Cooperation in Renewable Integrated Microgrids: A Linear Multiobjective Approach*, p.1-1, 2017, disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/318200567_D-FACTS Cooperation in Renewable Integrated Microgrids A Linear Multiobjective Approach](https://www.researchgate.net/publication/318200567_D-FACTS_Cooperation_in_Renewable_Integrated_Microgrids_A_Linear_Multiobjective_Approach), acessado em: 10 de jul. de 2022.

HINGORANI, N. G.; GYUGYI,. **Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission system**, New York: Wiley-IEEE Press, 1999. 452 p.

JALAYER, R.; MOKHTARI, H. A Simple Three-phase Model for Distributed Static Series Compensator (DSSC) in Newton Power Flow, p.1-5, 2009, disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4918117>, acessado em 11 de jul. de 2022.

JESUS, D. M. F. D.; SAMESIMA , I. Avaliação de Desempenho do Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR) na Compensação de Afundamentos e Elevações de Tensão. *in*: SNPTTE, XIX, 2007, Rio de Janeiro, V.1, p. 1-6

JOHNSON, B. K. **An Investigation of the Impact of Distributed Flexible AC Transmission System (D-FACTS) Devices on Transmission Line Protection**. 2020. 181f. dissertation (doctoral, Ph.D., Electrical and Computer Engineering)- University of Idaho - College of Graduate Studies, 2020.

JR, W. J. T. Cálculo de Fluxo de Potência Trifásico para Redes de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando o Método Soma de Potências Modificado. *in*: SBQEE, VI, 2005, Bélem, v.1, p.535-540.

JÚNIOR, D. P. **CONTROLADORES ELETRÔNICOS EM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA**. 2007, 93 f. trabalho de conclusão de pós doutorado (Pós Doutorado em Engenharia Elétrica)- Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by Simulated Annealing. n.220, p. 671–680, 1983, disponível em: <http://hedibert.org/wp-content/uploads/2013/12/1983KirkpatrickGelattVecchi.pdf>, acessado em: 20 de jul. de 2022.

LABORATÓRIO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA-LAPSEE. **Sistema Prático 135 barras**, 2022, Disponível em: https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/lapsee/system_135_distribution_feeder.rar, acessado em: 17 fev. 2022.

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2012, 496 p.

LODDI, T. **Cálculo de Fluxo de Potência Unificado em Sistemas de Transmissão e Redes de Distribuição através do Método de Newton Desacoplado Rápido com Rotação de Eixos**. 2010. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

MASUDA, M. **Aplicação do Dispositivo FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) em Sistema de Distribuição-Simulação de Desempenho**. 2006. 83f. dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- universidade de são paulo, São Paulo, 2006.

MOMOH, J. **Electric Power Distribution, Automation, Protection and Control**. new york: CRC Press, 2007. 378 p.

MORI, H. Optimal allocation of facts devices in distribution systems. v.2, p.936-937, 2001, disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/916998>, acessado em 20 de jul. de 2022.

NETO, J. V. et al. Boxplot: Um Recurso Gráfico para a Análise e Interpretação de Dados Quantitativo. v.1, p.1-6, 2017, disponível em: <https://www.robrac.org.br/seer/index.php/ROBRAC/article/view/1132/897>, acessado em 21 de jul. de 2022.

PAIVA, R. R. D. C. **Fluxo de Potência Ótimo em Redes de Distribuição de Energia com a Presença de Geração Distribuída: Um Novo Algoritmo para Auxiliar a Análise do Perfil de Tensão**. 2006. 108 f. dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - universidade federal de santa catarina, Florianópolis, 2006.

PEZZINI, P. E. A. FACTS location using genetic algorithm to increase energy efficiency in distribution networks. v. 13, p.1-8, 2009, disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5279283>, acessado em: 20 de ago. de 2022

RADMAN, G.; RAJE, R. S. Power flow model/calculation for power systems with multiple FACTS controllers. v. 77, p. 1521-1531, 2006, disponível em: https://www.researchgate.net/publication/223694785_Power_flow_modelcalculation_for_power_systems_with_multiple_FACTS_controllers, acessado em: 01 de ago. de 2022.

REIZ, C.; LEITE, J. B. Hardware-In-the-Loop Simulation to Test Advanced Automation Devices in Power Distribution Networks. v.36, n.4, p. 2194-2203, 2021, disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9187221>, acessado em: 8 de ago. de 2022.

SÁNCHEZ, A. F. S. **Ubicación de SVCs en Sistemas de Transmisión: Especificación y Diseño Básico**. 2014. 57 f. trabalho de fin de curso (Ingeniero Eléctrico)-Universidad de Los Andes, Bogotá, 2014.

SCHNEIDER, K. P. Analytic Considerations and Design Basis for the IEEE Distribution Test Feeders. v.33, n.3, p. 3181-3188, disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8063903>, acessado em: 14 de ago. de 2018.

SHEBLÉ, G. B.; WOLLENBERG, F.; WOOD, A. J. **Power Generation, Operation and Control**, Berlim: Wiley-Interscience, 2013. 632 p.

SILVA, D. D. D. **Modelagem de Equipamentos FACTS de Segunda Geração no Problema de Fluxo de Potência Ótimo**. 2008. 129 f. dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis , 2008.

SILVA, M. F. et al. Algoritmo Genético Aplicado ao Problema de Fluxo de Potência Ótimo em Sistemas Elétricos de Potência. CEEL, XVII, 2019, Uberlândia, v.1

SILVEIRA, E. P. **Otimização da Operação em Sistemas Distribuídos Utilizando Compensadores Estáticos de Reativo e Estimadores de Estados Robustos**. 2011. 121 f. tese (doutorado em Engenharia Elétrica)- Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.

VALLE, D.; ARAUJO,. The influence of GUPFC FACTS device on small signal stability of the electrical power systems. V.65, P.299-306, 2015, disponível em: https://www.researchgate.net/publication/268079845_The_influence_of_GUPFC_FACTS_device_on_small_signal_stability_of_the_electrical_power_systems, acessado em 7 de ago. de 2022.

VILATHGAMUWA, D. M.; WIJEKOON, H. M.; CHOI, S. S. Interline Dynamic Voltage Restorer: A Novel and Economical Approach for Multiline Power Quality Compensation. v. 40, n. 6, p. 1678-1685, 2004, disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1360016>, acessado em 14 de jul. de 2022.

URQUIZO, J. *et al. Using D-FACTS in microgrids for power quality improvement: A review.* p. 1-6, 2017, disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8247546>, acessado em: 19 de jul. de 2022.

WATANABE, E. H. et al. "Tecnologia facts - tutorial," SBA Controle & Automação, v.9, p.39-55, 1998, disponível em: <https://www.sba.org.br/revista/vol9/V9p39.pdf>, acessado em 12 de ago. de 2022