UNIVERSIDADE SALVADOR - UNIFACS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**UM ESTUDO COMPARATIVO DO
DESEMPENHO DE ALGORITMOS PARA A
RECONFIGURAÇÃO DE REDE ELÉTRICA**

ALYSSON RÔMULO DE SOUSA PEZZUTTI

ORIENTADOR: PROF. DR. JOBERTO S. B. MARTINS

Salvador – BA

Maio/2018

UNIVERSIDADE SALVADOR - UNIFACS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**UM ESTUDO COMPARATIVO DO
DESEMPENHO DE ALGORITMOS PARA A
RECONFIGURAÇÃO DE REDE ELÉTRICA**

ALYSSON RÔMULO DE SOUSA PEZZUTTI

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Salvador, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação, área de concentração: Smart Grid

Orientador: Prof. Dr. Joberto S. B. Martins

Salvador – BA

Maio/2018

A meus pais.

AGRADECIMENTOS

A meus pais, Paulo e Juscilene, meu infinito agradecimento. Sempre acreditaram em minha capacidade. Isso só me fortaleceu e me fez tentar, não ser O MELHOR, mas a fazer o melhor de mim. Obrigado pelo amor incondicional!

A meus irmãos, Julia e Rafael, pois mesmo indiretamente sempre me forneceram a coragem necessária para seguir adiante.

A meus amigos do mestrado, pelos momentos divididos juntos. Em especial meu amigo pra vida toda, Pedro, obrigado por dividir comigo as angústias e alegrias durante todo o percurso árduo e prazeroso que foi essa caminhada. Foi bom poder contar com vocês!

Agradeço, também, à CAPES pelo apoio financeiro, que me permitiu passar por essa etapa com mais tranquilidade.

Gostaria de agradecer à Universidade Salvador, e a todos os funcionários e professores, por abrirem as portas para que eu pudesse realizar esta conquista, proporcionando mais que a busca de conhecimento técnico e científico, mas uma LIÇÃO DE VIDA. E um agradecimento especial a querida Josiane que sempre me tratou muito bem, me ajudando em diversas situações.

Finalmente, gostaria de agradecer à meus eternos orientadores, Joberto Martins e Flávio Calhau, que me guiaram por todo esse percurso e acreditaram na minha capacidade.

Ninguém vence sozinho... OBRIGADO A TODOS!

Um dia você descobre que se leva muito tempo para se tornar a pessoa que se deseja tornar, e que o tempo é curto. Aprende que não importa até o ponto onde já chegamos, mas para onde estamos, de fato, indo - mas, se você não sabe para onde está indo, qualquer lugar servirá.(...) Aprende que heróis são pessoas que foram suficientemente corajosas para fazer o que era necessário fazer, enfrentando as consequências de seus atos. Aprende que paciência requer muita persistência e prática. Descobre que, algumas vezes, a pessoa que você espera que o chute quando você cai, poderá ser uma das poucas que o ajudará a levantar-se.

Veronica Shoffstall

RESUMO

As redes elétricas inteligentes, também conhecidas como *Smart Grids* (SGs) têm como uma de suas propostas básicas incorporar inteligência à rede elétrica por meio de tecnologias de computação e de comunicação visando uma maior eficiência e efetividade na sua operação e controle. As perdas de potência, qualidade e falhas são inerentes ao processo de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica e, no contexto das SGs, devem ser minimizadas para se garantir uma maior resiliência e eficiência do sistema. A reconfiguração dinâmica e eficiente da rede de distribuição (RD) é um exemplo de funcionalidade de uma SG. A reconfiguração consiste na sua essência em ajustar ou alterar a topologia da rede de distribuição a partir da abertura e fechamento de chaves de manobra visando minimizar perdas técnicas, otimizar parâmetros de operação e restaurar o fornecimento em situações de contingência. A natureza do problema de reconfiguração de rede é combinatória, complexa e não-linear. Com a necessidade de minimizar o tempo de convergência na busca de solução em médias e grandes topologias, técnicas heurísticas e de otimização são uma alternativa. Esta dissertação propõe um novo algoritmo genético GAEnhanced (*Genetic Algorithm Enhanced*) para a solução do problema de reconfiguração de rede (RD) e faz um estudo comparativo de aspectos de desempenho deste algoritmo em relação à outras soluções e estratégias algorítmicas utilizadas. O objetivo maior é avaliar as estratégias de implantação de algoritmos para a reconfiguração dinâmica e *on-the-fly* de redes de distribuição numa perspectiva mais ampla, além de propor uma nova solução com o algoritmo GAEnhanced. Um simulador (DNRSim) com funcionalidades básicas para implementação e testes de algoritmos de reconfiguração de RDs para a Smart Grid foi também desenvolvido no escopo desta dissertação. O estudo comparativo do desempenho do algoritmo GAEnhanced e demais soluções com o DNRSim utiliza os modelos do IEEE para testes de sistema (14-bus, 30-bus, 57-bus, 118-bus e 330-bus). O resultado do es-

tudo comparativo ilustra as diferentes formas de computar soluções de reconfiguração de rede de forma eficiente (escalabilidade, tempo e qualidade) e, além disso, demonstra a viabilidade de utilização do algoritmo GAEnhanced no contexto das *Smart Grids* numa perspectiva de implantação de soluções mais autônomicas e inteligentes.

Palavras-chave: Smart Grid, Rede de Distribuição, Reconfiguração de Rede, Algoritmos de Reconfiguração de Rede, Algoritmos Genéticos, Heurísticas de Otimização, GAEnhanced, Desempenho, HATSGA, DNRSim.

ABSTRACT

Smart grids (SGs) have as one of their basic proposals to incorporate intelligence into the electric grid through computing and communication technologies aiming at greater efficiency and effectiveness in their operation and control. Power loss, quality, and failures are inherent in the generation process, transmission, and distribution of electricity and, in the context of SGs, should be minimized to ensure greater resilience and system efficiency. Dynamic and efficient distribution network reconfiguration is an example of an SG functionality. The reconfiguration process consists of adjusting or changing the topology of the distribution network from the opening and closing of switches to minimize technical losses, optimize operating parameters, and restore power supply in contingency situations. The nature of the network reconfiguration problem is combinatorial, complex, and non-linear. Aiming to minimize convergence time in search of a solution in medium and large topologies, heuristic and optimization techniques are an alternative. This dissertation proposes a new genetic algorithm, GAEnhanced (Genetic Algorithm Enhanced), to solve network reconfiguration and make a comparative study of performance aspects of this algorithm in relation to other solutions and algorithmic strategies used. The main goal is to evaluate the algorithm implementation strategies for dynamic reconfiguration and on-the-fly distribution networks from a broader perspective, in addition to proposing a new solution with the GAEnhanced algorithm. A simulator (DNRSim) with basic functionalities for implementation and tests of network reconfiguration algorithms for the Smart Grid was developed within the scope of this dissertation. The comparative study of the performance of the GAEnhanced algorithm and other solutions with the DNRSim uses the IEEE models for system tests (14-bus, 30-bus, 57-bus, 118-bus, and 330-bus). The comparative study results illustrate the different ways to efficiently compute network reconfiguration solutions (scalability, time, and quality) and demonstrate the feasibility of using the

GAEnhanced algorithm in the context of Smart Grids in a perspective of deploying more autonomic and intelligent solutions.

Keywords: Smart Grid, Network Distribution, Network Reconfiguration, Network Reconfiguration Algorithms, Genetic Algorithms, Optimization Heuristics, GAEnhanced, Performance, HATSGA, DNRSim.

LISTA DE FIGURAS

2.1	Sistema IEEE 16bus (??).	26
2.2	a) Grafo G com 5 vértices e 7 arestas b) representação do grafo G por meio de listas de adjacência c) representação do grafo G por meio de matriz de adjacência (??).	28
2.3	a) Grafo G com 14 vértices e 20 arestas modificado do ieee 14bus b) MST retornada pelo algoritmo de Prim	29
2.4	Método de Newton (??)	31
3.1	Ciclo gerado pelo fechamento da aresta S1 (Calhau, 2016).	42
3.2	Fluxograma de um algoritmo genético simples (??).	46
3.3	Método de seleção por roleta (??)	47
3.4	Cruzamento em um ponto	49
3.5	Cruzamento em dois pontos	50
3.6	Mutação simples (??)	50
4.1	Fluxograma do algoritmo genético GAEnhanced	53
4.2	Geração de população através do elitismo	55
4.3	Geração de população através do elitismo	56

4.4	Vetores de arestas dos indivíduos selecionados para cruzamento modificado do GAEnhanced.	57
4.5	Vetor dos indivíduos descendentes do cruzamento modificado do GAEnhanced.	57
5.1	Fluxograma de execução do simulador DNRSim	62
5.2	Módulos do programa/simulador desenvolvido e relações com softwares externos	65
5.3	Modelagem computacional em grafos da rede IEEE 14-bus	67
A.1	Sistema IEEE 14 bus.	79
B.1	Sistema IEEE 30 bus.	81
C.1	Sistema IEEE 57 bus.	89
D.1	Sistema IEEE 118 bus.	100
E.1	Sistema IEEE 300 bus.	121

LISTA DE TABELAS

5.1	Formato de dados da linha de transmissão (LINEDATA)	63
5.2	Formato de dados dos barramentos (BUSDATA)	64
6.1	Espaço de busca de soluções em topologias radiais	69
6.2	Quantidade de topologias verificadas na busca de solução	70
6.3	HATSGA Results	71
6.4	EGA Results	72
6.5	Tempo computacional da função de perdas ativas	73
A.1	Bus data para o sistema IEEE 14 bus	78
A.2	Line data para o sistema IEEE 14 bus	79
B.1	Bus data para o sistema IEEE 30 bus	82
B.2	Line data para o sistema IEEE 30 bus	82
C.2	Line data para o sistema IEEE 57 bus	85
C.1	Bus data para o sistema IEEE 57 bus	90
D.3	Line data para o sistema IEEE 118 bus	91
D.1	Bus data para o sistema IEEE 118 bus	101
D.2	Table D.1 continued from previous page	102

E.6	Line data para o sistema IEEE 300 bus	103
E.1	Bus data para o sistema IEEE 300 bus	122
E.2	Table E1 continued from previous page	123
E.3	Table E1 continued from previous page	124
E.4	Table E1 continued from previous page	125
E.5	Table E1 continued from previous page	126

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	16
1.1 Relevância do Problema	18
1.2 Trabalho Proposto	19
1.3 Trabalhos Relacionados	19
1.4 Organização da Dissertação	22
CAPÍTULO 2 – O PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO DE REDE	23
2.1 Revisão Bibliográfica	23
2.1.1 Introdução	23
2.2 O Problema da Reconfiguração de Redes	24
2.3 Formulação Matemática do Problema de Reconfiguração	25
2.4 Aplicações da Teoria de Grafos	27
2.5 Métodos de Fluxo de Potência	30
2.5.1 Método de Newton-Raphson	31
2.5.2 Propostas Alternativas para o Cálculo de Fluxo de Carga	32
2.5.2.1 Método de Varredura Reversa/Direta	32

2.5.2.2	Método Gauss-Seidel	33
---------	-------------------------------	----

CAPÍTULO 3 – ALGORITMOS DE RECONFIGURAÇÃO DE REDE - ESTRATÉGIAS E IMPLEMENTAÇÃO 34

3.1	Introdução	34
3.1.1	Estratégias de Algoritmos de Reconfiguração de Rede	35
3.2	Estratégia de Heurística com Otimização	36
3.2.1	Estratégia de Busca Tabu	37
3.3	Algoritmo HATSGA	41
3.4	Estratégia com o Algoritmo Genético	45
3.4.0.1	Geração da População	46
3.4.0.2	Função de avaliação	46
3.4.0.3	Operadores de Seleção	47
3.4.0.4	Operadores de Cruzamento	49
3.4.0.5	Operadores de Mutação	50
3.4.0.6	Elitismo	51

CAPÍTULO 4 – O ALGORITMO GAENHANCED 52

4.1	Algoritmo Genético GAEnhanced - Descrição Geral	52
4.2	Algoritmo GAEnhanced - Fase de Inicialização dos Parâmetros	54
4.3	Algoritmo GAEnhanced - Fase de Seleção	55
4.4	Algoritmo GAEnhanced - Fase de Cruzamento	56

CAPÍTULO 5 – SIMULADOR DE RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE DIS-

TRIBUIÇÃO (DNRSIM)	59
5.1 Introdução	59
5.2 Linguagem “R”	60
5.3 Desenvolvimento do DNRSim	61
5.4 Arquitetura do DNRSim - Módulos e Interfaces	65
CAPÍTULO 6 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E VALIDAÇÃO	68
6.1 Introdução	68
6.2 Resultados da Comparação dos Procedimentos Busca Local	69
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	75
GLOSSÁRIO	77
APÊNDICE A – DADOS PARA O SISTEMA IEEE 14 BUS	78
APÊNDICE B – DADOS PARA O SISTEMA IEEE 30 BUS	81
APÊNDICE C – DADOS PARA O SISTEMA IEEE 57 BUS	85
APÊNDICE D – DADOS PARA O SISTEMA IEEE 118 BUS	91
APÊNDICE E – DADOS PARA O SISTEMA IEEE 300 BUS	103
REFERÊNCIAS	127

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Nos últimos 100 anos, não houve mudanças revolucionárias na estrutura da rede de energia elétrica (??). O sistema elétrico atual é um conjunto de usinas, subestações, linhas de transmissão e outros equipamentos que possibilitam a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em uma área específica cujo objetivo primário é fornecer energia aos consumidores finais. As perdas técnicas de potência são inerentes ao processo de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica e devem ser minimizadas para se garantir maior eficiência do sistema.

O Smart Grid (SG) representa uma visão moderna de uma rede elétrica dinâmica, em que a eletricidade e suas informações relacionadas fluem juntas em tempo real, com perdas econômicas mínimas provenientes de interrupções de fornecimento de energia e variações de qualidade de energia (??).

O Smart Grid visa novas tecnologias, protocolos, algoritmos, instalações de comunicação e aplicativos inteligentes que suportam uma rede elétrica mais eficiente em geração, transmissão, distribuição, e relacionamento entre mercado e cliente (??). Na área da distribuição, automação de distribuição, redes *Self-healing*, proteção e controle são aspectos técnicos abordados.

A reconfiguração da rede é um exemplo de funcionalidade de uma SG. Ela consiste em alterar a topologia da rede remotamente a partir da abertura e fechamento de chaves

de manobra, visando minimizar perdas técnicas, além de restaurar o fornecimento em situações de contingência, dentre outros (??).

No problema de reconfiguração de rede de grande porte, são aplicados métodos heurísticos e métodos meta-heurísticos, capazes de obter um ótimo global, mas sem provar a otimalidade, e geralmente são usados em problemas onde a busca exaustiva é proibitiva (??) (??).

A otimização das redes que compõem os sistemas elétricos bem como a motivação da transição das fontes de energia em busca de opções mais limpas, ou seja, renováveis, criam um cenário de favorável para criação de novas tecnologias e serviços, almejando suprir a crescente demanda por energia elétrica. Respalado neste cenário, o uso da simulação computacional como ferramenta de desenvolvimento é de grande importância.

A simulação computacional é um processo de experimentos em sistemas ou fenômenos físicos, realizados através de modelos matematicamente computadorizados, os quais representam resultado bem próximos observados em sistemas reais. Assim, é possível utilizar a simulação computacional como uma ferramenta de análise e soluções para problemas em sistemas elétricos, cooperando na melhoria de processos e inserção de novas técnicas, minimizando possíveis desgastes ao sistema real (??).

No domínio da distribuição, as configurações de reconexão automática de redes elétricas têm sido usadas há décadas e ainda estão sendo estudadas com foco em uma abordagem de *Self-healing* para a rede de distribuição. No entanto, os sistemas de autocura precisam incluir alguma lógica e inteligência, além de possuir uma atuação automática voltada para salvaguardar muitos fatores, incluindo disponibilidade de capacidade, divisão de carga, geração de distribuição, gerenciamento de qualidade de energia e microgrids (sistema de distribuição de energia composto por uma ou mais fontes de energia distribuída) (??).

O método de reconfiguração da rede de distribuição é o método preferido para reduzir perdas e restaurar falhas nos sistemas de distribuição porque não requer nenhum equipamento adicional para ser instalado, sendo desta forma, menos oneroso para a

concessionária, desde que todas as chaves e automotivos estejam instalados. As abordagens de algoritmos de reconfiguração de rede estão em vigor há algum tempo e incluem, em síntese, métodos heurísticos, métodos heurísticos em combinação técnicas de otimização e com algoritmos de otimização (??) (??) (??) (??) (??). Esses métodos têm vantagens e desvantagens e atualmente há um esforço contínuo na comunidade de pesquisa para investigar um conjunto adequado de possíveis métodos e algoritmos, incluindo híbridos, para suportar o novo cenário de reconfiguração do Smart Grid (SG).

Novos algoritmos são propostos e avaliados com o objetivo de ampliar o conjunto de pedágios oferecidos ao Smart Grid. Nessa pesquisa, não argumentamos ou discutimos se essas novas soluções dinâmicas e inteligentes devem atuar ou não diretamente sobre a rede física (configuração real). De fato, nosso objetivo é deliberadamente limitado a demonstrar a viabilidade da implementação do algoritmo para esse novo cenário de SG, deixando os problemas de gerenciamento para uma discussão adicional, haja vista não estar relacionado ao escopo do trabalho.

1.1 Relevância do Problema

Novos cenários SG levam em consideração soluções inteligentes com algum grau de autonomia no processo de reconfiguração de redes. Nesta perspectiva, o Smart Grid visa soluções inteligentes, autonômicas e eficientes para a rede (??) (??) .

Ao considerar os algoritmos de reconfiguração da rede de distribuição avaliados neste trabalho, o cenário e a motivação são investigar uma reconfiguração eficiente da rede de perda de energia e qualidade de energia com computação quase on-the-fly para sistemas grandes e complexos. Novos algoritmos são propostos e avaliados com o objetivo de ampliar o conjunto de ferramentas e soluções oferecidos no contexto Smart Grid.

1.2 Trabalho Proposto

Nesta dissertação foi desenvolvido um algoritmo genético modificado, GAEnhanced, que tem como foco manter um bom desempenho tanto em relação ao tempo computacional quanto ao valor de perda de potencia ativa durante a busca de solução para o problema de reconfiguração de redes elétricas. O ganho de eficiência do GAE reside nas modificações na etapa de cruzamento, removido a operação de mutação, almejando reduzir o impacto estocástico no GAE inerente a uma algoritmo genético em seu conceito original.

Por fim foi criado um protótipo de simulador (DNRSim) cuja implementação foi baseado na linguagem "R", voltado para implementação e testes de algoritmos aplicadas ao problema de reconfiguração em Smart Grids (??).

1.3 Trabalhos Relacionados

O objetivo da otimização é alterar a topologia da rede e obter a melhor configuração possível, minimizando as perdas técnicas, alterando as chaves de interconexões. O problema de reconfiguração possui as seguintes restrições (??): (i) limites superior e inferior de voltagens das barras das linhas de transmissão; (ii) limites superior e inferior das correntes elétricas nas linhas de transmissão, (iii) condições factíveis em termos de topologia de rede (estrutura radial). O termo radial refere-se a uma configuração que possua todos os nos interconectados, mas sem a existência de ciclos.

O problema de reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica aspirando a redução de perdas de potência ativa, ou perdas técnicas, foi analisado primeiramente por Merlin e Back (??) e posteriormente, por (??), (??) e (??), sendo os quatro artigos os pioneiros nesta área, tornando-os citados em praticamente todos os outros trabalhos consequentes.

O método de Merlin e Back (1975) ficou conhecido como “abertura sequencial de chaves”. Por intermédio de um algoritmo heurístico construtivo, este método resumia-

se em fechar todas as chaves de interconexões abertas no sistema, realizar os cálculos de fluxos de carga do sistema, e encontrar o fluxo de potência do circuito. Neste ponto era realizado um laço (Loop), onde o circuito que apresenta o menor fluxo de potência torna-se candidato para ter sua chave de interconexão aberta, até que uma solução radial seja encontrada. O trabalho de Civanlar é baseado em técnicas exatas, sendo inviável para redes de grande porte. Já os trabalhos de Baran e o de Shirmohammadi propõem o uso da heurística branch exchanges, ou permutação de ramos, que não garante o ótimo global (??).

A reconfiguração do sistema de energia é complexo devido a sua natureza combinatoria (??). Sua natureza não linear, combinatório, inteiro misto e não-diferenciável, faz dos Algoritmos Evolucionários escolhas atraentes para sua resolução. Entre os tipos de algoritmos evolucionários mais utilizados, destacam-se o uso de algoritmos genéticos (AG), a otimização por colônia de formigas (ACO) e a otimização por nuvem de partículas (PSO).

Em (??), foi divulgado o primeiro método baseado em algoritmos genéticos para solução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição. O trabalho utiliza os fundamentos da genética e seleção natural para gerar um conjunto de soluções iniciais, as quais são denominadas de pais e em seguida criam-se cópias idênticas com menores perdas. Através do método de recombinação são geradas outras novas soluções, as quais são denominadas de filhos. Por fim aplica-se o processo de mutação com objetivo de eliminar as soluções não radiais. Já em (MENDOZA J.; LOPEZ, 2006) é proposto e avaliado um método que visa a melhoria da capacidade de adaptação e a eficiência de algoritmos genéticos, quando aplicado ao problema de reconfiguração voltado para perda mínima de energia.

Em (??) utilizada a estratégia da busca tabu para realizar o processo de troca de Ramos (Branch Exchange). Esse método consiste na realização de alterações sucessivas na configuração da rede. (por exemplo, atuando na abertura de uma chave e no fechamento de outra) de forma que cada nó da árvore de busca seja uma possível solução do problema. Esta solução demonstrou-se viável para utilização em pequenos cenários,

porém se tornariam mais pesados para sistemas de tamanho mais realista.

Os métodos de busca tabu, demonstraram-se uma boa solução para soluções de pequeno porte, como apresentado em (??) e (??), mas assim como em (??), redes de grande escala tornavam o algoritmo lento. Em (??) no entanto, foi apresentado uma estratégia híbrida que utiliza as vantagens da busca tabu para soluções rápidas, com o auxílio dos fundamentos da genética e seleção natural para realizar processos de seleção no intuito de reduzir o espaço de busca da solução.

O algoritmo de colônia de formigas apresentado em (??), procura um caminho ideal em um gráfico, com base no comportamento das formigas que buscavam um caminho entre suas colônias e uma fonte de alimento. A ideia original desde então se diversificou para resolver um classe de problemas numéricos e, como resultado, surgiram vários problemas, com base em vários aspectos do comportamento das formigas. Em (??) foi proposto um algoritmo híbrido baseado em sistemas imunológicos artificiais e otimização de colônias de formigas para a reconfiguração do sistema de distribuição, uma inovação adicional foi o uso das feromonas para obter soluções rápidas para restaurar o sistema de distribuição em situações de contingência.

A otimização por nuvem de partículas (PSO) é um método de otimização estocástico baseado em populações, geralmente inspirados em bandos de pássaros ou cardumes de peixes. O PSO procura a solução ideal usando a população de partículas em que cada uma das soluções representa uma solução candidata para o problema de otimização. Em (??) são descritas várias propostas baseadas em PSO.

A grande variedade de técnicas de otimização modelam-se de acordo com a forma com que o problema de configuração é abordado, tal como: mono ou multiobjetivo, quais serão as restrições e a finalidade da reconfiguração. Como exemplo: reconfiguração emergencial mediante à faltas, reconfiguração automática e telecomandada (??).

Nesta dissertação uma das contribuições é o desenvolvimento do algoritmo GAE-nhanced. Este utiliza uma estratégia completamente desacoplada no ponto de cruzamento possibilitando uma mesclagem de arestas de modo disforme e maximizando a

possibilidade de geração de indivíduos melhores.

1.4 Organização da Dissertação

Os outros capítulos desta dissertação estão organizado da seguinte maneira:

- Capítulo 2: neste capítulo é apresentado a reconfiguração de rede, relatando os problemas e trabalhos relacionados, formulação matemática, aplicações da teoria de grafos e os métodos de fluxo de potência mais utilizados na literatura.
- Capítulo 3: neste capítulo, aborda-se as estratégias de algoritmos de reconfiguração de rede utilizadas, tal como a implementação do algoritmo HATSGA.
- Capítulo 4: É apresentado o Algoritmo GAENHANCED que é uma das contribuições do trabalho.
- Capítulo 5: neste capítulo, é apresentado simulador de reconfiguração de rede de distribuição (DNRSIM), explicando sua arquitetura e desenvolvimento.
- Capítulo 6: neste capítulo, são apresentados resultados da otimização para as 5 redes do IEEE.

Após o capítulo 6, são apresentadas as conclusões seguidas pelas referências bibliográficas

Capítulo 2

O PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO DE REDE

2.1 Revisão Bibliográfica

2.1.1 Introdução

Diversas estratégias de otimização sucederam-se na literatura, a partir de 1975, para solucionar o problema de reconfiguração de rede de distribuição de energia. Para o problema de reconfiguração de rede de grande porte, são aplicados métodos heurísticos e métodos meta-heurísticos, capazes de obter um ótimo global, mas sem provar a otimalidade, e geralmente são usados em problemas aonde a busca exaustiva é proibitiva (??).

Os métodos heurísticos consistem em parâmetros de desempenho composto de diversas fontes, dentre estas, o senso crítico do pesquisador, modelos matemáticos do problema ou a análise de sensibilidade. De antemão, as técnicas meta-heurísticas constituem-se de métodos de busca, guiados por estratégias que tentam evitar os mínimos locais do espaço de busca. Entre os métodos meta-heurísticos mais aplicados a problemas de otimização destacam-se: algoritmos evolucionários (AE), recozimento simulado, busca tabu, otimização por colônias de formigas (ACO) e otimização por

nuvens de partículas (PSO), sistemas imunes artificiais (AIS), entre outras (??).

2.2 O Problema da Reconfiguração de Redes

As abordagens de GA para reconfiguração de rede com foco em qualidade de energia e confiabilidade foram previamente consideradas usando GA (??) , GA-Fuzzy (??) , GA-Tabu Search (??) e Improved-GA (??) , mas eles não discutem os critérios de escalabilidade e computação para o novo SG. Uma proposta relativamente recente de Gupta et al. (??) usando a abordagem GA, concentra-se no problema de confiabilidade com as configurações radiais sendo exploradas para um melhor perfil de tensão do nó, menos perda de energia do alimentador e melhor confiabilidade. Esta proposta utiliza funções multi-objetivos mais complexas e tenta melhorar a operação inerente a GA com a escala de referência para sistemas de até 69 barramentos.

Em relação aos trabalhos relacionados, nos quais utilizam o algoritmo Genético, a proposta, GAEnhanced, utiliza uma nova etapa de seleção por elitismo na fase de cruzamento fazendo com que os valores idênticos na mesma posição do vetor sejam mantidos (ao contrário das abordagens relacionadas). Isso aumenta a probabilidade de gerar um indivíduo melhor para formar a nova população.

Uma questão básica discutida nesta seção é por que investigar e comparar heurísticas híbridas e algoritmos de abordagens genéticas para a reconfiguração no cenário SG. A forma como essa análise comparativa se relaciona com outros trabalhos de pesquisa na área também é apresentada.

As soluções heurísticas inicialmente propostas para a reconfiguração da rede desenvolvem basicamente uma fórmula empírica para avaliar a redução de perdas em função das operações de comutação. As principais vantagens dessas soluções iniciais foram a determinação de configurações de comutação com perdas reduzidas e uma aproximação razoavelmente precisa aos fluxos de carga. As principais desvantagens incluem a dificuldade de adotar uma maneira sistemática de avaliar uma solução ótima e o foco na perda com um comportamento aproximado do sistema (??)(??).

Os métodos heurísticos com otimização foram abordagens adotadas para a reconfiguração de redes e ainda é válida para pesquisas atuais (Calhau, 2017). A mistura de métodos de heurística e otimização permite a capacidade de reter um certo grau de precisão para a solução, melhorar a convergência e, finalmente, facilitar o alcance de um tempo de solução aceitável. O tempo de solução aceitável, nem sempre possível com métodos heurísticos puros, é, nos dias atuais, um requisito fundamental para o SG. As soluções reais da SG, em contraste com as soluções da última década, devem ser dinâmicas, incluir algumas capacidades de cognição e ser capazes de lidar com redes de distribuição grandes e complexas e geração distribuída (??).

2.3 Formulação Matemática do Problema de Reconfiguração

O sistema de distribuição consiste em dois tipos de interruptores: interruptor de ligação e interruptor de seccionamento. Conforme mostrado na Figura 2.1, os interruptores $S14$, $S15$ e $S16$ são os interruptor de ligação que estão abertos e os interruptores contínuos são chamados interruptor de seccionamento que geralmente são fechados. Quando as condições de operação são anormais ou são submetidas a uma alteração, é realizada uma reconfiguração do sistema durante o qual, um dos interruptores de ligação é fechado e uma parte da carga é transferida para outro alimentador e para manter a radialidade, simultaneamente deve ser aberto um interruptor de seccionamento. Por exemplo, se a rede for reconfigurada e o interruptor de ligação fechado for o $S14$, então, para manter a radialidade, digamos que o $S2$ é aberto.

Matematicamente, o problema pode ser formulado da seguinte forma (??):

$$MinZ = \frac{\sum_{i=1}^L r_i(P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} \quad (2.1)$$

Sujeito a:

Figura 2.1: Sistema IEEE 16bus (??).

$$g(x) = 0 \quad (2.2)$$

$$V_i^{min} < V_i < V_i^{max} \quad (2.3)$$

$$I_i^{min} < I_i < I_i^{max} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \det(A) = 1 \quad \text{ou} \quad -1 \quad &\text{sistema radial} \\ \det(A) = 0 \quad &\text{sistema não radial} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Onde,

Z : Custo da função

L : Numero de linhas de transmissão

P_i : Perda de potência ativa na barra i

Q_i : Potência reativa na barra i

V_i : Voltagem na barra i

I_i : Corrente atual na linha i

$g(x)$: Equações de fluxo de potência

V_i^{min} : Limite de tensão inferior

V_i^{max} : Limite de tensão superior

I_i^{min} : Limite de corrente inferior

I_i^{max} : Limite de corrente superior

A : Matriz de incidência da barra

r_i : Resistência da secção

A natureza não linear do sistema de distribuição exige que em cada iteração de um algoritmo de otimização seja realizada uma operação de fluxo de carga para determinar um novo ponto de operação do sistema. Com as facilidades disponíveis hoje, a análise de fluxo de carga pode ser realizada de forma eficiente em termos de tempo, porém sucessivos procedimento de fluxos de carga podem representar procedimento demorado.

2.4 Aplicações da Teoria de Grafos

a) Heurística de Detecção de Radialidade

A representação de uma rede elétrica utilizando teoria de grafos, utilizando a modelagem da conectividade por meio de grafos traz vantagens para a verificação e a manutenção da radialidade da rede, durante o processo de otimização, requisito essencial para o funcionamento de qualquer Algoritmo de otimização utilizado na reconfiguração de redes.

Um grafo G é definido por um conjunto de nós ou vértices V , conectados por arestas

ou arcos A , $G(V,A)$. Nas abordagens utilizadas neste trabalho, o grafo terá como nós as barras do sistema elétrico e como arestas as linhas de conexão. A literatura apresenta diversas maneiras de se modelar um grafo, como, por exemplo, por meio de matrizes (matrizes de incidência e matrizes de adjacências) e estruturas de adjacências, tais como listas encadeadas ou tabelas hash. Alguns exemplos são encontrados na Figura 2.2.

Figura 2.2: a) Grafo G com 5 vértices e 7 arestas b) representação do grafo G por meio de listas de adjacência c) representação do grafo G por meio de matriz de adjacência (??).

A teoria dos grafos utilizada neste tipo de abordagem foi o clássico algoritmo de busca em profundidade em grafos, Depth-first search(DFS), que possibilita a detecção de ciclos nos grafos, ou seja, configurações não radiais. Ao efetuar a busca DFS em um grafo que apresente a existência de ciclos, um dos vértices será visitado mais de uma vez.

b) Heurística de Extração de Subgrafos

Para a criação do procedimento de busca local foi utilizada uma função que retorna todos os caminhos entre dois vértices, e na geração de topologias radiais foi utilizado do algoritmo de Prim (??). O algoritmo de Prim resolve o problema da árvore de extensão mínima (Minimum Spanning Tree - MST) de um grafo. Uma árvore de extensão mínima é o subconjunto de arestas de um grafo que conecta todos os vértices deste e com o menor custo, isto é, o somatório dos pesos das arestas deve ser minimizado. Outro algoritmo clássico que determina a MST de um grafo é o algoritmo de Kruskal (Kruskal, 1956). Ao contrário do algoritmo de Prim que retorna uma única árvore para o grafo fornecido, o subconjunto retornado pelo algoritmo de Kruskal pode ser uma floresta, caso o grafo fornecido possua elementos desconectados (??), no entanto devido a restri-

ção de radialidade do problema de reconfiguração, este algoritmo não se torna atrativo para este tipo abordagem.

Um exemplo da utilização do algoritmo de Prim para geração de grafos radiais é apresentado na Figura 2.3, na rede de 14 barras do ieee, onde 2.3b será o subgrafo gerado e utilizado como possível topologia inicial, sendo que o peso das arestas pode ser gerado tanto de forma aleatória quanto atribuído a algum dado elétrico tais como resistência, reatância ou impedância.

Figura 2.3: a) Grafo G com 14 vértices e 20 arestas modificado do ieee 14bus b) MST retornada pelo algoritmo de Prim

O algoritmo de Prim também foi utilizado para verificação de radialidade de um grafo G , neste caso são atribuídos valores análogos a todas as arestas, e caso a MST retornado seja igual ao grafo G , este é radial.

Para procedimento de busca local foi utilizado uma função que retorna todos os caminhos entre determinados vértices, por exemplo na Figura 2.3b, caso a aresta $S4$ seja fechada, existirão dois caminhos entre os vértices 2 e 4, sendo estes $(S4)$ e $(S3, S6)$, ao realizar a união desses dois caminhos é retornado o ciclo existente na topologia.

2.5 Métodos de Fluxo de Potência

A análise de fluxo de potência em redes elétricas resume-se essencialmente na determinação do estado da rede, da distribuição dos fluxos e das injeções de potências ativa e reativa nas barras, dentre outras grandezas de interesse. No modelo matemático do fluxo de potência, são especificadas três tipos de barras de acordo com as variáveis conhecidas e desconhecidas (??):

- Barra Slack ou barra de referencia, normalmente a barra de geração de maior capacidade, onde o módulo da tensão e o ângulo da tensão são conhecidos e o programa de fluxo de potência calcula a potência ativa e reativa.
- Barras de carga, onde a potência ativa e reativa para estas barras são conhecidas e o programa de fluxo de potência calculará a magnitude da tensão e seu ângulo.
- Barras controladas por tensão, onde a potência ativa e a tensão são conhecidas e o programa de fluxo de potência calculará a potência reativa e o ângulo da tensão. Geralmente, são barras conectadas com geradores de menor capacidade.

Para se resolver o fluxo de potência, são escritas as equações do balanço de potência ativa e reativa para cada barra. De acordo com (??), as equações para potência ativa e reativa injetadas na barra k são representadas nas equações 2.6 e 2.7.

$$P_k = V_k \sum_{n=1}^N b V_n (G_{kn} \cos \theta_{kn} + B_{kn} \sin \theta_{kn}) \quad \forall k \in B \quad (2.6)$$

$$Q_k = V_k \sum_{n=1}^N b V_n (G_{kn} \sin \theta_{kn} + B_{kn} \cos \theta_{kn}) \quad \forall k \in B \quad (2.7)$$

Nestas equações, G_{kn} representa a condutância do elemento referente a k -ésima linha e n -ésima coluna da matriz de admitância nodal do sistema, B_{kn} é a susceptância relativo a este mesmo elemento da matriz de admitância e θ_{kn} é a diferença entre os ângulos de tensão das barras k e n .

2.5.1 Método de Newton-Raphson

O método de Newton é amplamente utilizado em cálculos de fluxo de carga. Isso se deve basicamente a significativa redução do tempo computacional, bem como no rápido processo de convergência e precisão dos resultados apresentados.

Como é apresentado em (??), se considerado a equação algébrica não-linear $g(x) = 0$, busca-se determinar o valor de x onde a função $g(x)$ se anule. A busca da solução do método de Newton pode ser resumida na Figura 2.4, onde x_s é a solução esperada.

Figura 2.4: Método de Newton (??)

Basicamente calcula-se a distância entre os pontos x_s e x_o por meio da expansão da função $g(x)$ em torno de x_o , com isso o valor de Δx é calculado por $\frac{g(x_o)}{g'(x_o)}$, atribuindo-se um novo valor para x_s . Sendo assim, a diferença entre x_1 e x_o pode ser maior ou menor que a tolerância permitida para o valor de x_s . Em casos que a tolerância for maior que o desejado, é recalculado um novo ponto para x_s , ou se o valor for menor que a tolerância imposta, o resultado é considerado como aceitável a tolerância permitida.

Uma vez que algumas das redes simuladas apresentam mais de um alimentador e por permitir o fechamento em anéis, ainda que em situações de contingência, o método de Newton-Raphson foi considerado o mais adequado para a solução das configurações de redes propostas neste trabalho.

2.5.2 Propostas Alternativas para o Cálculo de Fluxo de Carga

O método de Newton-Raphson é a forma mais comum de cálculo de fluxo de carga. Porém, não é a única forma aplicada na solução do problema. Pode-se afirmar que a solução para o fluxo de carga é objeto de estudos até os dias atuais. Durante as últimas décadas, diversas implementações tentam melhorar o tempo computacional, com precisão nos resultados fornecidos. Dentre estas se destacam os métodos de varredura reversa/direta(MVR/D) e o método Gauss-Seidel

2.5.2.1 Método de Varredura Reversa/Direta

O método de varredura reversa/direta (MVR/D) apresentou-se como uma possibilidade para a solução do fluxo de potência em redes radiais com problemas de mal condicionamento numérico que podem ocorrer nos métodos de Newton-Raphson (??).

Em (??) é apresentado um MVR/D que fundamenta-se em:

- Varredura reversa, onde é realizado o somatório das correntes nas barras (nós do grafo), partindo-se das barras mais extremas, em direção ao nó raiz;
- Varredura direta, em que ocorre o cálculo das tensões nas barras com o uso das correntes calculadas na varredura reversa.

De acordo com (??), o MVR/D possui duas limitações que requerem a necessidade de adaptações do método que são:

- inversões do sentido do fluxo de potência, impossibilitando o cálculo de fluxo em alimentadores com geração distribuída;
- O método requer que as redes sejam radiais, não permitindo a simulação de “fechamento em anéis”.

2.5.2.2 Método Gauss-Seidel

Este método caracteriza-se por ser parcialmente indiferente às tensões iniciais, pouco requerimento de memória computacional e simplicidade de programação. A característica radial dos sistemas faz com que os valores da diagonal da matriz Y sejam pequenos. Logo, como o perfil de tensões da próxima iteração é inversamente proporcional a tais valores. Dessa forma, serão produzidas grandes oscilações da tensão tornando lenta a convergência, demonstrando-se pouco atrativo (??). Este método varre cada nó de forma sequencial, devido a sua característica de convergência linear, atualizando sua tensão de acordo com as tensões das barras vizinhas (??).

Capítulo 3

ALGORITMOS DE RECONFIGURAÇÃO DE REDE - ESTRATÉGIAS E IMPLEMENTAÇÃO

3.1 Introdução

A avaliação de estratégias de implementação de algoritmos para a reconfiguração de rede discutida neste capítulo segue a seguinte ordem de discussão:

- Apresenta-se um resumo do conjunto de estratégias para os algoritmos de reconfiguração de rede; e
- Discute-se as estratégias e compara-se o desempenho de dois algoritmos representativos para o método aproximado: algoritmos HATSGA e GAEnhanced.

O algoritmo HATSGA é apresentado em (??) e será resumido quanto às suas estratégias de implementação. O algoritmo GAEnhanced foi desenvolvido pelo autor desta dissertação tendo como objetivo criar um novo algoritmo para a reconfiguração de rede e, também, possibilitar a avaliação de estratégias algorítmicas para a reconfiguração de rede. O alvo num cenário de *Smart Grid* são as redes de grande porte cujo desempenho do algoritmo utilizado é de fundamental importância.

3.1.1 Estratégias de Algoritmos de Reconfiguração de Rede

Existe uma diversidade de algoritmos de reconfiguração de rede cuja estratégia básica de implementação consiste em encontrar, dentre todas as combinações de topologia possíveis, um conjunto de topologias que:

- reduzam a perda de energia e/ou minimizam um conjunto de parâmetros para a operação da rede; e
- minimizam o número de operações de comutação de chaves mantendo a estrutura radial da rede no processo de busca e otimização.

De maneira mais pragmática e além dos objetivos principais citados acima, a reconfiguração de rede também pode ser empregada visando a redução do número de consumidores sem fornecimento de eletricidade.

Ademais, é fundamental proteger as restrições dos níveis de tensão nos pontos de carga, maximizar o fluxo de corrente nos ramos e proteger a capacidade de fluxo das linhas e a potência nominal dos transformadores (??).

Conforme apresentado em (??), as técnicas utilizadas pelos algoritmos de reconfiguração podem ser divididas em dois grandes grupos:

- Métodos exatos; e
- Métodos aproximados.

Os métodos exatos são capazes de encontrar o ótimo global e provar que a solução é ótima. Estes métodos utilizam estratégia semelhante aos algoritmos *Branch and Bound* (??) (??) e são utilizados tipicamente em redes mais simples. Por "rede simples", entende-se redes de pequeno porte que possuem até 40 barramentos (??). Para o problema de reconfiguração em rede de grande porte, não existe um método exato e que seja eficiente na busca da sua solução (??). Como o alvo deste trabalho de dissertação

é o *Smart Grid* com um cenário de redes de distribuição de grande porte, os métodos exatos não serão considerados.

Os métodos aproximados dividem-se em métodos heurísticos e meta-heurísticos (??). Estes métodos são aptos a encontrar o ótimo global, mas sem provar sua eficácia e regularmente são empregados em problemas para os quais a busca exaustiva é proibitiva. Isso devido ao tempo de busca da solução tender a ser demasiadamente longo, como por exemplo em redes de grande porte. Por "rede de grande porte", são consideradas as topologias que apresentam ao menos 100 barramentos em sua estrutura (??).

A sequência de apresentação e discussão relativa às estratégias de implementação utilizadas pelos algoritmos de reconfiguração de rede no restante deste capítulo será como segue:

- Estratégia de heurística com otimização (seção 3.2);
- Estratégia do algoritmo HATSGA com método aproximado (seção 3.3);
- Estratégia dos algoritmos genéticos (seção 3.4); e
- Estratégia do algoritmo GAEnhanced (Capítulo 4).

3.2 Estratégia de Heurística com Otimização

O problema de reconfiguração de rede com o intuito de gerar uma redução de perda elétrica, foi proposto primeiramente por (??). Eles usaram uma mistura de heurísticas e técnicas de otimização para encontrar a configuração operacional de perda mínima para um sistema de distribuição que foi representado por uma estrutura de árvore geradora. O uso de heurísticas foi justificado pela necessidade de reduzir o número de iterações e além de que a convergência em grandes redes, não lineares, torna-se difícil sem a aplicação de regras heurísticas.

Muitas pesquisas baseadas em heurísticas e técnicas de otimização tem sido utilizadas desde então (??) (??) (??). A mesclagem dos tipos de técnicas permite que o

problema mantenha um certo grau de precisão, garantindo simultaneamente a convergência e um tempo de solução aceitável.

Em (??) são apresentadas algumas vantagens e desvantagens em utilizar uma estratégia heurística com técnicas de otimização. As principais vantagens são:

- As soluções alcançadas são muito próximas da solução ideal;
- O tempo computacional é melhorado quando comparado ao método puramente heurístico; e
- O caminho de busca é cortado até certo ponto, o que permite reduzir o número de ações de comutação realizadas.

Por outro lado, as principais desvantagens com esses métodos são:

- Embora a solução obtida esteja próxima da solução ideal, o grau de precisão da solução é aproximada até certo ponto; e
- Quando aplicada para sistemas com grandes quantidades de barramentos, o tempo de computação tende a se tornar alto.

Nas próximas subseções, são discutidas as heurísticas com otimização do algoritmo de Busca Tabu e do algoritmo genético. Essas duas estratégias serão explicadas com maior detalhe, haja vista que são as heurísticas utilizadas no desenvolvimento dos dois algoritmos foco do estudo comparativo de desempenho objeto deste trabalho (HATSGA e GAEnhanced). O HATSGA utiliza uma estratégia híbrida entre a Busca Tabu e o algoritmo genético. Enquanto que o GAEnhanced é um algoritmo genético melhorado.

3.2.1 Estratégia de Busca Tabu

Nesta seção apresentamos a Busca Tabu (??) em uma estratégia simples com dois elementos-chave: i) restrição da busca classificando certos movimentos como proibidos

(tabu); e ii) liberao da busca por uma funo de memria de curto prazo que cria um "esquecimento estratgico".

A Busca Tabu uma estratgia para resolver problemas de otimizao combinatria. um procedimento adaptativo com a capacidade de fazer uso de muitos outros mtodos, como algoritmos de programaao linear e heurstica especializada, com o objetivo de superar as limitaes da otimizao local (??). O algoritmo pode ser utilizado na resoluo de uma gama muito grande de problemas combinatrios com grande sucesso. O algoritmo inicia da mesma forma que um algoritmo de busca local, progredindo iterativamente de um ponto (soluo) para outro at que algum critrio de parada seja satisfeito (??).

O funcionamento do algoritmo que utiliza a estratgia de Busca Tabu de forma simplificada apresentado no algoritmo 1.

A estratgia de Busca Tabu simples retratado na literatura como descida simples, utilizando como referncia a heurstica de alpinismo, no entanto colina invertida de modo que a direo da subida descendente (??). A finalidade deste mtodo a minimizao de uma funo objetivo $f(x)$ ou um mtodo correspondente ascendente cuja meta seria a maximizao de uma funo objetivo $f(y)$, o qual permite-se apenas movimentos para solues vizinhas que melhorem a funo objetivo (??).

Os movimentos "tabu" so armazenados numa lista T (1), onde so mantidos os registros dos atributos que foram alterados de acordo com os movimentos realizados. Os elementos de T so determinados por uma funo que utiliza informaes histricas do processo de busca, estendendo-se at t iteraes no passado, onde t pode ser um valor fixo ou varivel dependendo da aplicao ou estgio da busca. Os elementos referentes ao subconjunto T so designados por meio de uma lista discriminada ou por referncia a um conjunto de condies tabu (por exemplo, desigualdades lineares, relaes lgicas ou radialidade da topologia no caso da reconfigurao de rede).

As informaes contidas nessa memria permitem rotular como tabu-ativos os atributos selecionados de configuraes que foram visitadas em um passado recente. Isso

evita que o algoritmo utilize configurações outrora usadas, fazendo com que o algoritmo busque soluções em novas regiões (??). No entanto, essa estratégia pode incorrer em um problema adicional, ou seja, pode impossibilitar o algoritmo de encontrar soluções de boa qualidade se estas configurações possuírem um atributo proibido.

Este problema adicional do algoritmo é contornado criando-se um mecanismo de "esquecimento estratégico", no qual permite-se anular a restrição de um atributo tabu de uma configuração, desde que um critério pré-estabelecido seja satisfeito. Esse mecanismo chama-se 'critério de aspiração' e pode ser aplicado de varias maneiras diferentes, dependendo do objetivo do algoritmo. O critério de aspiração pode ser definido de várias formas, sendo muito utilizado aquele em que é permitido um movimento tabu desde que esse movimento forneça um valor de função objetivo melhor que o encontrado até o momento (??).

Algorithm 1 Pseudocódigo de um procedimento de Busca Tabu simples (??)

```

 $S_0 \leftarrow$  solução inicial
 $s^* \leftarrow s$  (Melhor solução obtida até então)
 $Iter \leftarrow 0$  (Contador do número de iterações)
 $MelhorIter \leftarrow 0$  (Iteração mais recente que forneceu  $s^*$ )
 $BTmax \leftarrow$  número máximo de iterações sem melhora em  $s^*$ 
 $T \leftarrow \emptyset$  (Lista Tabu)
Inicialize a função de aspiração  $A$ 
while  $Iter - MelhorIter \leq BTmax$  do
     $Iter \leftarrow Iter + 1$ 
    if  $s'$  não é tabu ou atende a condição de aspiração then
        Atualize a Lista Tabu  $T$ 
         $s \leftarrow s'$ 
    end
    if  $f(s) < f(s^*)$  then
         $s^* \leftarrow s$ 
         $MelhorIter \leftarrow Iter$ 
    end
    Atualize a função de aspiração  $A$ 
end
Retorne  $s^*$ 

```

Em resumo, a estratégia de Busca Tabu simples atua conforme abaixo (??):

- Realiza busca com K transições através das configurações de um problema. O valor de K pode ser predefinido ou adaptativamente determinado.
- Dentre os vizinhos da configuração atual, deve ser detectado o que menos degrade a função objetivo.
- Uma configuração é válida se não existirem atributos proibidos, ou que esta respeite ao critério de aspiração.

- A lista tabu é atualizada a cada iteração do algoritmo.

"A eficiência da Busca Tabu depende, em sua maior parte, da qualidade da modelagem. Por exemplo, um ajuste fino dos parâmetros do método nunca será capaz de balancear uma má escolha de estrutura de vizinhança da função objetivo. Por outro lado, uma modelagem eficiente deve levar a técnicas robustas que não sejam tão sensíveis a configurações distintas de parâmetros."(??)

A estratégia apresentada denominada Busca Tabu simples é baseada na implementação mais básica do algoritmo. A Busca Tabu simples utiliza estruturas de memória de curto prazo, ou seja, apenas são mantidos os registros dos atributos que foram alterados durante os mais recentes movimentos feitos pelo algoritmo. Ademais existem modificações que podem utilizar estruturas de memória de longo prazo (memória baseada em frequência, intensificação e diversificação) (??). Outras estratégias complementares também podem ser incorporadas ao escopo do algoritmo, como por exemplo a utilização de configurações de elite em Busca Tabu, *Path Relinking* e Oscilação Estratégica (??).

3.3 Algoritmo HATSGA

O algoritmo HATSGA (??) é um híbrido entre um algoritmo genético e a Busca Tabu. O HATSGA utiliza uma estratégia de manipulação que permite minimizar o espaço de busca, eliminando a possibilidade de verificar configurações de topologia que não cumprem o critério de restrição radial. Isso por meio de um método de geração de ciclos induzido.

A estratégia de Busca Tabu é iniciada com uma vizinhança composta por um conjunto de soluções com características “muito próximas”, e a estratégia da Busca Tabu é percorrer a vizinhança dessa solução em busca de outra com valor menor (baseado na função objetivo). Caso a solução vizinha for encontrada, esta torna-se a solução atual

e o algoritmo prossegue. Caso não encontre uma melhor solução vizinha, a solução corrente é um ótimo local em relação à vizinhança adotada.

Por outro lado, o algoritmo HATSGA utiliza um grafo radial inicial, válido (uma solução) para o problema em questão, obtido com a utilização do algoritmo de Prim (??). A partir do grafo inicial é realizado o processo de geração de ciclos induzidos (novas vizinhanças), o que possibilita encontrar soluções ótimas para o problema. Isso ao invés de ficar restrito a um espaço de busca (vizinhança) como adotado pelo algoritmo de busca Tabu.

Na Figura 3.1 tem-se a representação de um grafo radial, onde a aresta $S1$ está desconectada, representada por uma linha pontilhada. O HATSGA utiliza do fechamento de arestas abertas para gerar os laços. Na Figura 3.1, observa-se que ao fechar a aresta $S1$ é criado um ciclo $(S1, S2, S7, S6, S3)$, a partir deste ponto é realizado o processo de otimização, COH (*Cluster Optimization Heuristic*) (Calhau, 2016).

Figura 3.1: Ciclo gerado pelo fechamento da aresta $S1$ (Calhau, 2016).

O algoritmo de busca Tabu funciona com um método de descida simples, cujo o objetivo é a minimização de uma função $f(x)$. Porém, o algoritmo de busca Tabu permite apenas movimentos para soluções vizinhas que melhorem a função objetivo.

O algoritmo HATSGA utiliza multicritérios e o método de seleção baseado no elitismo (subseção 3.4.0.6) para encontrar uma solução adequada ao problema. Além de buscar a minimização de uma função $f(x)$ (perda ativa de energia), o algoritmo HATSGA utiliza critérios como a qualidade da solução encontrada (variação de tensão nos barramentos), prioridades na indução de ciclos (topologias reconfiguradas) e a combinação destes.

O pseudocódigo da implementação deste algoritmo (HATSGA) é mostrado no Algoritmo 2.

Algorithm 2 HATSGA Pseudocode (??)

Read Line Data and Bus Data
 $S_o \leftarrow$ Initial Solution $P_a \leftarrow$ Active Loss of S_o $Min \leftarrow P_a$; $K_o \leftarrow$ Tie Switches on S_o **for each** K_o **do** $switch = 1$ (Close switch)

Search Loop

 $Listc \leftarrow$ List of Loops**end****for each loop in** $Listc$ **do**

Choose switches based on selection process

 $Listps \leftarrow$ List of switches chosen by elitism**end**Create TL (Tabu List)**for each topologies generated by switches status in** $Listps$ **do** **if not exit in** TL **then** Update TL Compute P_a (New active loss) **if** $P_a < Min$ **then** $Min \leftarrow P_a$ **end** **end****end**

O processo de geração de vizinhança oriundo da Busca Tabu, é obtido através de uma sub-heurística do HATSGA por meio do COH, que é responsável por gerar e solucionar ciclos que reduz o espaço de busca local de solução, sendo que esta etapa deve ser repetida até que seja percorrido todos os possíveis ciclos geráveis na solução atual.

3.4 Estratégia com o Algoritmo Genético

"A computação evolucionária (CE) é um ramo da ciência da computação que propõe um paradigma alternativo ao processamento de dados convencional. Este novo paradigma tenta resolver problemas a partir de mecanismos evolutivos encontrados na natureza, tais como a auto-organização e o comportamento adaptativo. Esses conceitos foram introduzidos e formalizados por Charles Darwin na sua teoria da evolução natural, do qual, a vida na terra resulta de uma seleção realizada pelo meio ambiente, onde os mais aptos e adaptados possuem mais chances de reproduzir-se"(??).

Com base neste paradigma, segundo Pereira (2014), a programação evolucionária, do inglês *Evolutionary Programming* (EP), foi introduzida por Lawrence Fogel (??), e as estratégias evolucionárias, do inglês *Evolution Strategy* (ES), foram introduzidas por I. Rechemberg (??) e H.P. Schwefel (??). Em 1975 foi desenvolvido um algoritmo que simula a evolução Darwiniana para resolver problemas práticos de otimização (??), porém a primeira utilização do termo “Algoritmo Genético” e sua aplicação, segundo (??), foram na dissertação de (??). Em (??) foi proposto um método baseado em um algoritmo genético para o problema de reconfiguração de redes elétrica para minimizar perda de potência e maximizar a confiabilidade do sistema.

Os algoritmos genéticos são uma família de modelos computacionais inspirados na evolução e incorporam uma solução potencial para um problema específico. Uma estrutura semelhante a de um cromossomo é utilizada e operadores de seleção, cruzamento e mutação são aplicados na busca de uma solução do problema. Estes operadores são modificados até que o algoritmo obtenha o objetivo global ou seja interrompido por algum critério de parada. Na literatura, o algoritmo que contém um método de seleção e os operadores de cruzamento e mutação é conhecido por algoritmo genético simples, do inglês *Simple Genetic Algorithm* (SGA), e foi descrito por (??).

O funcionamento dos blocos fundamentais de um algoritmo genético simples (SGA) proposto por (??) é resumido no fluxograma da Figura 3.2.

Figura 3.2: Fluxograma de um algoritmo gentico simples (??).

3.4.0.1 Gerao da Populao

Uma populao de n indivduos gerada aleatoriamente. Cada um dos indivduos da populao representa uma possvel soluo para o problema, ou seja, um ponto no espao de solues. Por exemplo, um indivduo x teria a sua j -sima varivel inicializada da seguinte maneira: $x_j = x_{jmin} + rand[0, 1] \cdot (x_{jmax} - x_{jmin})$, onde $rand[0, 1]$ gera valores entre 0 e 1, gerado de uma funo de densidade probabilstica com distribuio uniforme e x_{jmin} e x_{jmax} equivalem ao valor mnimo e mximo o qual pode atribuir-se a varivel. Por fim, o indivduo que representa a configurao do sistema eltrico, includo na populao inicial.

3.4.0.2 Funo de avaliao

Para definir quem so os indivduos mais apropriados para resolver o problema deve-se definir uma funo de avaliao (*fitness*) do algoritmo gentico. A funo *fitness* fornece como sada o melhor indivduo encontrado aps o processo evolutivo. Desta forma, o melhor indivduo, aquele com melhor valor de avaliao, escolhido para

integrar uma nova população.

3.4.0.3 Operadores de Seleção

Na literatura, existem diversos métodos de seleção, como por exemplo o método da roleta, o método do torneio e o elitismo. No método de seleção por Roleta, exemplificado de maneira hipotética na Figura 3.3, cada indivíduo da população é apresentado na roleta com um valor relativo ao seu índice de aptidão (??). Isso pode ser expresso pela razão do valor da sua *fitness*, em relação ao somatório do valor da *fitness* de todos os indivíduos da população. Assim, para realizar a seleção de um indivíduo, simula-se o sorteio de um número em uma roleta e compara-se este número com a probabilidade do indivíduo ser selecionado.

Figura 3.3: Método de seleção por roleta (??)

Apesar de ser amplamente utilizado, um dos principais problemas deste método é em relação ao seu tempo de processamento já que o método exige duas passagens por todos os indivíduos da população. Um exemplo da implementação deste método, é mostrado a seguir no Algoritmo 3:

Algorithm 3 Pseudocódigo básico do método de seleção por roleta.(??)

 $T \leftarrow$ Soma dos valores de aptidão de todos os indivíduos da população**for** cada indivíduo da população **do** $r =$ valor aleatório entre 0 e T Percorra sequencialmente os indivíduos da população, acumulando em S o valor de aptidão dos indivíduos já percorridos **if** $S \geq r$ **then**

| Selecione o indivíduo corrente

end**end**

Um outro método é a seleção por Torneio, onde um número n de indivíduos da população é escolhido aleatoriamente para formar uma sub-população temporária (??). Deste grupo, o indivíduo selecionado dependerá de uma probabilidade k definida previamente. Um exemplo básico da implementação deste algoritmo é mostrado no Algoritmo 4, onde $n = 2$:

Algorithm 4 Pseudocódigo básico do método de seleção por torneio. (??)

 $k = 0.75$ **for** N vezes **do**

Escolha 2 indivíduos da população aleatoriamente

 $r =$ valor aleatório entre 0 e 1 **if** $r < k$ **then**

| O melhor indivíduo é escolhido

else

| O pior indivíduo é escolhido

end**end**

3.4.0.4 Operadores de Cruzamento

Este operador é considerado o operador genético predominante (??). Através do cruzamento são gerados novos indivíduos (população) mesclando características de dois indivíduos existentes na população corrente. Esta mistura é feita baseado na reprodução de genes em células. Setores que possuem as características de um indivíduo são trocados por suas parcelas equivalentes do outro. O resultado desta operação é um indivíduo que virtualmente associe as melhores características dos indivíduos usados como base. Alguns tipos de cruzamento bastante utilizados são o cruzamento em um ponto e o cruzamento em dois pontos.

Com um ponto de cruzamento, seleciona-se aleatoriamente um ponto de corte do cromossomo. Cada um dos dois descendentes recebe informação genética de cada um dos pais como apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4: Cruzamento em um ponto

Com dois pontos de cruzamento, Figura 3.5, um dos descendentes fica com a parte central de um dos pais e as partes extremas do outro pai e vice versa.

Figura 3.5: Cruzamento em dois pontos

3.4.0.5 Operadores de Mutação

Esta operação tem a função de modificar aleatoriamente alguma característica do indivíduo sobre o qual é aplicada, o que pode contribuir (ou não) para a solução do problema (Figura 3.6). Este fator é uma das características que contribuem para a natureza estocástica dos AG, pois da mesma forma que este pode reinserir novas informações, pode restaurar o material genético perdido nos processos de seleção, cruzamento e até mesmo na própria mutação (??). O operador de mutação é aplicado aos indivíduos através de uma taxa de mutação geralmente pequena.

Figura 3.6: Mutação simples (??)

3.4.0.6 Elitismo

O elitismo é a técnica de seleção que busca preservar o(s) melhor(es) indivíduo(s) de uma população. Esses indivíduos, considerados como elite de uma geração, são utilizados para melhorar a população futura. Isso significa que o melhor "cromossomo" de uma geração G é automaticamente transmitido para a geração $G + 1$. Com o método de seleção por elitismo, a qualidade da melhor solução em cada geração aumenta constantemente ao longo do tempo (??).

Com a utilização dos outros métodos de seleção apresentados na seção 3.4.0.3, existe sempre a possibilidade de haver uma degradação na qualidade das gerações, devido às suas características estocásticas. Por outro lado com a utilização do elitismo, no pior caso, a próxima geração vai possuir um indivíduo tão bom quanto a anterior.

Desta forma, ao se utilizar o elitismo, os AGs tem seu desempenho melhorado, pois se permite que o mesmo explore novas gerações, conjunto de indivíduos gerado a partir da população anterior, sem haver degradação de desempenho durante o processo iterativo, pois as soluções mais bem adaptadas até então têm sua sobrevivência assegurada.

Baseado neste aspecto e em comparação às características estocásticas dos outros métodos de seleção apresentados, nos algoritmos desenvolvidos foram utilizados o elitismo com o intuito de ampliar a probabilidade de se obter um valor ótimo de reconfiguração de redes elétricas.

Capítulo 4

O ALGORITMO GAEnhanced

Neste capítulo é apresentado o algoritmo genético GAEnhanced desenvolvido como uma das contribuições deste trabalho de dissertação.

O GAEnhanced tem como objetivo manter um bom desempenho tanto em relação ao tempo computacional quanto ao valor de perda de potência ativa. Com este objetivo estratégico, foram realizadas modificações na etapa de cruzamento, tal como foi removida a operação de mutação, visando reduzir o impacto estocástico no algoritmo.

4.1 Algoritmo Genético GAEnhanced - Descrição Geral

A Figura 4.1 apresenta o fluxograma do algoritmo GAEnhanced desenvolvido. Em relação aos algoritmos genéticos clássicos, a solução desenvolvida inclui os blocos tradicionais dos algoritmos genéticos e os referentes às modificações no processo de seleção e de cruzamento que serão detalhados nas seções 4.3 e 4.4.

Em suma, o algoritmo GAEnhanced gera uma população inicial (solução) minimizando a aleatoriedade inerente ao algoritmo genético. A partir daí, mantém a busca por uma solução melhor (avaliação Fitness) sob a perspectiva do "elitismo" no operador de seleção. O algoritmo GAEnhanced também utiliza o método de elitismo no cruzamento escolhendo os "melhores" parâmetros elétricos que potencialmente influenciam na redu-

Figura 4.1: Fluxograma do algoritmo genético GAEnhanced

ção da perda ativa de energia para gerar uma nova população (solução). O pseudocódigo de implementação do algoritmo GAEnhanced é ilustrado no algoritmo 5

Algorithm 5 pseudocódigo do algoritmo GAEnhanced.

População inicial $P_0 \leftarrow$ Utilização do Algoritmo de *Prim*

Avaliar a aptidão $f(P_0)$ dos indivíduos de (P_0)

$MaxIter \leftarrow x$ (Número máximo de iterações)

repeat

$Parents \leftarrow$ Selecionar os melhores indivíduos a serem usados pelos operadores genéticos

$CrossoverPoint \leftarrow$ Selecionar os melhores parâmetros elétricos dos indivíduos previamente eleitos (parâmetros elites)

$Offspring \leftarrow$ Gera indivíduos resultantes da combinação dos parâmetros elites

Avaliar a aptidão $f(Offspring)$ dos novos indivíduos

Substituir os piores indivíduos da população pelos melhores indivíduos encontrados

$MaxIter \leftarrow x - 1$

until $MaxIter = 0$ ou avaliação fitness desejada;

A lógica de operação (algoritmo 5) do algoritmo GAEnhanced e suas respectivas fases (fluxograma 4.1) são detalhados nas próximas seções.

4.2 Algoritmo GAEnhanced - Fase de Inicialização dos Parâmetros

O algoritmo GAEnhanced procura o ótimo global em um espaço de dimensão D . D é o conjunto de topologias possíveis utilizadas pelo algoritmo para realizar transformações sucessivas de topologias em uma certa ordem de geração e percurso em busca de uma solução.

Ele é inicializado com uma população de n indivíduos. Os indivíduos da primeira geração são criados com o auxílio do algoritmo de *Prim*, detalhado na seção 2.4. Isso permite que todos os componentes da população inicial sejam válidos com uma topologia radial.

Uma das etapas de um AG é a avaliação da função fitness, ou desempenho, da população. Para o indivíduo optou-se por utilizar como valor da fitness, o valor da perda de potencia ativa, cujo valor é calculado pelo programa de fluxo de potência (explicado na seção 2.5).

4.3 Algoritmo GAEnhanced - Fase de Seleção

O GAEnhanced utiliza o método de seleção por elitismo, onde são selecionados os dois melhores indivíduos da geração inicialmente criada. A Figura 4.2 ilustra a atuação do método de elitismo em uma topologia original (grafo IEEE 14 bus). A partir da Figura 4.2a o elitismo gera uma nova topologia radial ilustrada na Figura 4.2b.

Figura 4.2: Geração de população através do elitismo

Quando uma nova população é gerada por cruzamento existe a possibilidade de perder os melhores cromossomos. A ideia básica do elitismo é utilizar os melhores cromossomos (ou os poucos melhores cromossomos) para gerar uma nova população. Os melhores cromossomos são selecionados baseados nos parâmetros elétricos das linhas de transmissão (resistência, reatância e impedância). O elitismo pode aumentar rapidamente o desempenho do AG, porque evita a perda da melhor solução já encontrada.

4.4 Algoritmo GAEnhanced - Fase de Cruzamento

A fase de cruzamento (*crossover*) utiliza os indivíduos mantidos pela seleção (elitismo) para prover modificações em suas características gerando descendentes para a próxima geração (população).

Alguns tipos de cruzamento bastante utilizados são o cruzamento em um ponto e o cruzamento em dois pontos (explicado na subseção 3.4.0.4). Estes tipos de cruzamentos setorizam o indivíduo em porções. Uma das contribuições do GAEnhanced é na fase de cruzamento. O GAEnhanced adota um cruzamento misto, haja vista que é completamente desacoplado, possibilitando uma mesclagem de arestas de modo disforme, e maximizando a possibilidade de geração de indivíduos melhores.

Na fase de cruzamento a topologia 1 (Figura 4.3a) e a topologia 2 (Figura 4.3b) são transformadas em vetores de valores 0 e 1. Estes vetores representam respectivamente as arestas abertas (0) e fechadas (1) das topologias. A Figura 4.4 ilustra os vetores binários da situação das arestas pertinentes às topologias 1 e 2 respectivamente.

Figura 4.3: Geração de população através do elitismo

O processo de combinações inicia-se através do cruzamento de todas as arestas S_n que se encontram com status distintos (0 ou 1) nas respectivas posições dos vetores. No processo de cruzamento ou reprodução, cada aresta é considerada um ponto de cruzamento. Porém, o algoritmo GAEnhanced utiliza uma nova etapa de seleção por elitismo fazendo com que os valores idênticos na mesma posição do vetor sejam mantidos. Desta

	S1	S2	S3	S4		S19	S20												
Topology 1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
Topology 2	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1

Figura 4.4: Vetores de arestas dos indivíduos selecionados para cruzamento modificado do GAEnhanced.

forma, são mantidas as melhores arestas previamente selecionadas aumentando a probabilidade de gerar um individuo melhor para formar a nova população. Esta etapa é exemplificada na Figura 4.5. O vetor “Descendent” é utilizado como um padrão para a criação da nova população. As arestas representadas pelo simbolo de interrogação, podem ser combinadas entre 0 e 1 no processo de busca da solução.

Topology 1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
Topology 2	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1
Descendent	1	?	1	1	?	0	0	1	1	?	?	?	1	1	0	1	1	?	?

Figura 4.5: Vetor dos indivíduos descendentes do cruzamento modificado do GAEnhanced.

No entanto, existe a possibilidade de dois indivíduos possuírem um valor alto de arestas com valores distintos (por exemplo, acima de 30%). Caso isso aconteça, a geração de uma nova população tem um alto custo computacional que depende da dimensão das topologias. O GAEnhanced resolve esse problema utilizando uma outra operação de elitismo no conjunto de arestas que extrapolarem o limite considerado (30% de arestas com valores distintos no caso da implementação realizada).

O algoritmo GAEnhanced traz contribuições na melhoria do algoritmo genético tradicional. As contribuições do GAEnhanced são:

- Estratégia completamente desacoplada no ponto de cruzamento possibilitando uma mesclagem de arestas de modo disforme e maximizando a possibilidade de geração de indivíduos melhores.
- GAEnhanced utiliza uma nova etapa de seleção por elitismo na fase de cruza-

mento fazendo com que os valores idênticos na mesma posição do vetor sejam mantidos. Isso aumenta a probabilidade de gerar um indivíduo melhor para formar a nova população.

- O GAEnhanced propõe uma solução quando conjunto de arestas apresentam muitos valores distintos entre si, o que tornaria mais custoso em termos computacionais gerar novas populações.

Capítulo 5

SIMULADOR DE RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO (DNRSIM)

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento de um simulador para avaliação de desempenho de algoritmos voltados ao problema de reconfiguração de redes elétricas. O simulador desenvolvido é designado como DNRSim - Simulador de Reconfiguração de Rede de Distribuição (do inglês, *Distribution Network Reconfiguration Simulator*).

5.1 Introdução

O estudo de avaliação de desempenho é uma técnica que vem sendo muito utilizada para a análise de sistemas. A avaliação de desempenho é aplicada em problemas que apresentem dificuldade de modelagem analítica ou matemática bem como em situações difíceis de serem executadas experimentalmente. A avaliação de desempenho pode ser utilizada para validar resultados obtidos com a modelagem analítica ou medições.

Para o desenvolvimento do simulador realizou-se uma pesquisa sobre simuladores de código aberto, buscando-se uma opção para ser utilizada para a modelagem de redes elétricas e a implementação de algoritmos de reconfiguração de redes. Na literatura existem diversos métodos e algoritmos para reconfiguração de redes elétrica (seção

1.3). Entretanto, no escopo de busca realizado, não foi encontrado uma ferramenta de simulação de código aberto que atendesse às necessidades do trabalho, como:

- Obter o valor médio encontrado por algoritmos distintos aplicados.
- Apresentar o desempenho computacional das estratégias adotadas em diversas topologias, inclusive na presença de falhas.
- Analise de escalabilidade das soluções.

O simulador proposto neste trabalho (DNRSim) foi implementado de modo a torná-lo o mais modular possível, haja vista que a arquitetura modular possibilitar a realização de análise de desempenho dinâmico. O DNRSim foi desenvolvido na linguagem R (??), sendo esta uma das linguagens de programação mais adequadas e referenciadas para a modelagem e avaliação da reconfiguração de rede (??).

As justificativas técnicas do DNRSim ter sido implementado na linguagem R são discutidas na próxima seção.

5.2 Linguagem “R”

R é uma linguagem interpretada tipicamente utilizada através de um interpretador de comandos. A linguagem R é expansível com o uso dos pacotes (funções específicas). Existem uma variedade de funções específicas, como por exemplo: variedade de modelagens lineares e não lineares, testes estatísticos clássicos, análise de séries temporais, *machine learning*, dentre outros. Inclusive, empresa como o Facebook e FourSquare, utilizam a linguagem R para modelagem de comportamentos dos usuários.

A linguagem R não é limitada a apenas sessões iterativas, pois devido ao fato de ser uma linguagem de programação, os *scripts* podem ser criados e empacotados como bibliotecas. A linguagem R também se integra bem com outros ambientes ou linguagens de programação como Matlab, C ++ e Java.

A linguagem R é uma linguagem de programação dinamicamente tipada, ou seja, podemos modificar os tipos de dados contidos em variáveis em tempo de execução. Com isso, temos uma vantagem em termos da programação pois não precisamos realizar conversões dos tipos de dados.

5.3 Desenvolvimento do DNRSim

O DNRSim tem seu funcionamento representado no fluxograma da Figura 5.1. A estrutura funcional do simulador pode ser dividida em etapas, a saber: 1) acesso a base de dados; 2) seleção de parâmetros característicos; e 3) aplicação do processo de geração populacional, com o intuito de gerar indivíduos com características relevantes para a simulação.

As etapas apresentadas no fluxograma integram o processo de simulação com o objetivo de encontrar e analisar as soluções bem como a curva de desempenho da estratégia utilizada. Desta forma, pode-se observar se o algoritmo utilizado é capaz de encontrar uma solução aceitável para problema levando em consideração as restrições do sistema (e possíveis eventualidades da rede elétrica, como falhas) e as necessidades do usuário.

A explicação dos blocos do fluxograma de execução do simulador DNRSim (Fluxograma 5.1) segue adiante.

A base de dados utilizada no simulador desenvolvido neste trabalho utiliza os dados físicos da rede elétrica, adquirida através dos casos para testes (do inglês, *text cases*) de sistemas elétricos do IEEE (??). Estes dados foram definidos baseando-se nos requisitos da ferramenta de cálculo de fluxo de potência (seção 2.5) empregada (??) e foram especificadas duas tabelas para esta modelagem: LINEDATA e BUSDATA.

A Tabela 5.1 define o formato em que os dados da linha de transmissão devem ser preparados para servirem de entrada no simulador. Os dados são inseridos em um formato de colunas, onde a primeira coluna contém os números dos barramentos de origem, a partir do qual uma linha emana, e a segunda coluna o número dos barramentos

Figura 5.1: Fluxograma de execução do simulador DNRSim

onde essas linhas terminam. As quantidades, R, X e $1/2B$ são as propriedades elétricas da linha, enquanto a tap ratio representa as configurações do transformador tap e o limite da linha representa a classificação térmica da linha.

Tabela 5.1: Formato de dados da linha de transmissão (LINEDATA)

Column	Description	Unit
1	From Bus	N/A
2	To Bus	N/A
3	Resistance (R)	p.u
4	Reactance (X)	p.u
5	Line Charging ($1/2B$)	p.u
6	Transformer Tap Ratio	p.u
7	Line limit	MVA

A Tabela 5.2 define o formato de dados para inserir os parâmetros em cada barramento no sistema de energia. Os dados são inseridos em um formato de coluna, pois cada barramento possui um código e número. Os códigos são divididos em 3 categorias:

- Tipo 0 - barramentos de carga
- Tipo 1 - barramentos slack
- Tipo 2 - barramentos geradores

Ademais, em todos os barramentos devem ser especificados valores para os seguintes parâmetros:

- Magnitude da tensão
- Ângulo da tensão
- Cargas (PLoad QLoad)
- Geração (P-Gen e Q-Gen)
- Limites de potência reativa (Q-min Q-max)

- Shunt Capacitance

No que tange aos valores pertinentes aos limites de tensão (V-min e V-max), estes não são obrigatórios.

Tabela 5.2: Formato de dados dos barramentos (BUSDATA)

Col	Description	Unit
1	Bus Number	N/A
2	Bus Code	N/A
3	Voltage magnitude	p.u
4	Voltage angle	Degree
5	P-Load	MW
6	Q-Load	MVar
7	P-Gen	MW
8	Q-Gen	MVar
9	Q_min	Mvar
10	Q_max	Mvar
11	Shunt Capacitance	Mvar
12	V_min	p.u
13	V_max	p.u

De acordo com a base de dados importada, é gerada a topologia original utilizada para realizar o processo de simulação. Os cenários de testes utilizados em 6.2 são as topologias IEEE (??). Para realizar o processo de geração da população inicial, foi utilizado o algoritmo de Prim (??), com o intuito de se obter indivíduos que satisfaçam a restrição de radialidade de tal forma que o tempo computacional empregue nesta etapa introdutória, não venha a degradar os resultados desejados na solução final.

Após a geração de uma população inicial, é realizado o processo de cálculo de fluxo de potencia com o auxílio da ferramenta MATPOWER (??), que neste escopo é utilizado para definir o nível de perda ativa relativo a cada topologia.

Com a população inicializada e os dados de perda ativa equivalentes a estes, o simulador DNRSim inicia o processo de reconfiguração de rede de acordo com o algoritmo executado.

5.4 Arquitetura do DNRSim - Módulos e Interfaces

A arquitetura do DNRSim foi concebida de forma modular. A Figura 5.2 descreve tanto a arquitetura como a interação entre os módulos e demais componentes externos.

Figura 5.2: Módulos do programa/simulador desenvolvido e relações com softwares externos

O módulo Principal é responsável por receber a topologia do módulo de otimização e aplicar funções de cálculo de fluxo de potência e retornar o resultado ao módulo de otimização. O módulo Principal realiza a integração e coordena o fluxo de processos entre os módulos de acordo com o “caso de uso”, bem como a escolha das técnicas heurísticas (implementadas no módulo de otimização) a serem utilizadas na busca da solução. Como exemplos de casos de usos, cita-se: a) reconfiguração de uma das redes do IEEE importada; b) otimização da configuração, realizada através da escolha das técnicas heurísticas implementadas e/ou acopladas juntamente com chamada de funções para cálculo do fluxo de potência (Matpower / RPowerLabs).

O módulo de Otimização é utilizado para implementar ou acoplar as técnicas heurísticas de otimização (algoritmos) que serão utilizadas na busca por uma solução para o problema de reconfiguração de redes. Os algoritmos GAEnhanced e o HATSGA foram implementados neste módulo. O DNRSim por ter uma estratégia modular pode ser alterado isoladamente, nos respectivos módulos, sem ter de se alterar toda a estrutura do simulador. Esta facilidade permite a inserção e utilização de vários algoritmos ao simulador. Outra vantagem da arquitetura modular é a procura de erros, haja vista que

possibilita a depuração dentro de cada função dentro do referido módulo, sem interferir na operação global do simulador. Este módulo retornará uma topologia válida, no formato de tabela, atendendo a todas as restrições, ao módulo principal.

O módulo de Importação de topologias importa os dados das redes de testes disponibilizada pelo IEEE (Figura 5.3a). Estes dados estão no formato de arquivo ".csv"(Figura 5.3b). O módulo de importação formata os dados elétricos das linhas e barramentos do sistema em tabelas (Tabelas 5.1 e 5.2) e os dados de conexões de barramentos são transformados em matrizes de adjacências. A matriz de adjacência gerada pelo módulo de importação será utilizada como parâmetro de entrada de informação para o módulo de grafos.

O módulo de Grafos implementa a modelagem computacional da rede elétrica através de grafos (nós e arestas), conforme ilustrado na Figura 5.3c. Este módulo de grafos utiliza o pacote Igraph (??) cujas funções inerentes a mesma para manipulação e busca em grafos são utilizadas para realizar adaptações (reconfiguração) necessárias à topologia da rede. Este módulo é responsável por verificar restrições de radialidade e conectividade dos grafos, retornando como resultado uma topologia válida, além de possibilitar variações das populações (topologias) correntes. Algoritmos de manipulação de grafos, como o de Prim, foram desenvolvidos neste módulo.

Os dados de simulação (soluções propostas pela técnica heurística) são enviadas ao Shiny. O Shiny é um pacote desenvolvido na linguagem R que permite estruturar tanto a interface com o usuário quanto o processamento de dados, geração de visualizações e modelagem, além de permitir a criação de aplicativos web interativos. Os dados da simulação são organizados e apresentados como uma rotina que é traduzida para HTML, onde as interações com o usuário podem ser registradas como comandos que o console R utiliza para preencher os parâmetros da simulação (escolha da técnica heurística, topologia inicial, quantidade de simulações).

O programa fluxo de potência Matpower, produzido pela universidade de Cornell (??), e pela função disponibilizada pelo RPowerLabs são exemplos de componentes externos utilizados pelo DNRSim.

Figura 5.3: Modelagem computacional em grafos da rede IEEE 14-bus

O Matpower é desenvolvido na linguagem Matlab, cuja linguagem de programação utilizada no desenvolvimento permite a leitura e escrita em arquivos MAT. A função do RPowerLabs é desenvolvido em R, no entanto este possui uma restrição na quantidade de barramentos no grafo (14 barramentos), o que o impossibilitou sua utilização em todas os casos de teste realizados.

Capítulo 6

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E VALIDAÇÃO

6.1 Introdução

O Simulador de Reconfiguração de Rede de Distribuição (DNRSim) foi utilizado para obter os resultados da simulação dos algoritmos de reconfiguração de redes elétricas. O DNRSim é um simulador desenvolvido com base na plataforma de linguagem R. O DNRSim foi desenvolvido e implementado possibilitando a inclusão de novos módulos e funções de cálculos. O método Newton-Rapson, para calcular a perda de energia, o algoritmo de Prim para gerar topologias radiais foram implementados e inseridos no simulador.

A utilização de topologia de rede inicial é carregada juntamente com seu respectivo conjunto de parâmetros elétricos pertinentes as linhas de transmissão e dados dos barramentos (Edge Parameters Matrix - EPM e Vortex Parameters Matrix - VPM) utilizados para calcular a perda de energia baseada na solução de reconfiguração encontrada. Os parâmetros de saída principais do DNRSim incluem perda de energia e fluxo de energia sobre a rede interconectada, permitindo análises de distribuição de energia.

Os resultados foram obtidos através da simulação de dois algoritmos heurísticos, no DNRSim, a saber: algoritmo de otimização (HATSGA) e o algoritmo genético aprimorado (GAEnhance). Para a simulação foram utilizados os cenários de teste com IEEE

14-Bus, IEEE 30-Bus, IEEE 57-Bus, IEEE 118-Bus e IEEE 300-Bus (??). O espaço de busca de soluções varia de acordo a topologia escolhida. A Tabela 6.1 apresenta o espaço de busca de possíveis topologias radiais usadas pelo algoritmo de reconfiguração da rede.

Tabela 6.1: Espaço de busca de soluções em topologias radiais

IEEE Topologia	Barramentos	Chaves	Número de Topologias Radiais
14-Bus	14	20	3909
30-Bus	30	41	7824000
57-Bus	57	80	2.193e +20
118-Bus	118	186	2.159e+41
300-Bus	300	411	2.366e+64

Os testes de simulação foram computados em um MacBook com uma CPU Intel Core i7 2.6 Ghz e 8 GB de RAM. O tempo de computação de perda de energia foi medido pela função "proc.time" disponível no ambiente de programação "R". Esta função determina o tempo computacional (em segundos) que o processo em execução (código HATSGA e GAEnhanced) consome.

6.2 Resultados da Comparação dos Procedimentos Busca Local

O número de possíveis de topologias de árvores radiais, Tabela 6.1, tem relação direta com a característica de escalabilidade dos algoritmos avaliados. O espaço de busca aumenta exponencialmente para a busca de uma solução de reconfiguração de rede em topologias maiores. Topologias com muitas chaves de manipulação devem ser consideradas para o novo cenário de SG. Ambos os algoritmos, baseados em heurísticas com otimização e abordagens genéticas aprimoradas adotam métodos para reduzir o espaço de busca. O HATSGA usa uma abordagem de agrupamento com elitismo para reduzir o número de topologias radiais efetivamente avaliadas. Enquanto que o algoritmo

GAEnhanced usa o elitismo durante a fase de reprodução que, potencialmente, cria topologias inadequadas devido às suas características aleatórias. O uso do elitismo durante a fase crítica reprodução genética, minimiza-se o número calculado de topologias radiais utilizadas para o cálculo de perda de potência.

A Tabela 6.2 ilustra o espaço de busca médio efetivamente calculado através da heurística com otimização (HATSGA) e abordagens genéticas (GAEnhanced). Observa-se que o algoritmo de heurística com otimização é melhor para todos os cenários de teste IEEE, com o espaço de busca tendendo a ser substancialmente reduzido para configurações maiores enquanto que o algoritmo com abordagens genéticas gera muito mais topologias possíveis para a busca de solução, porém utiliza uma quantidade pequena para calcular as perdas, haja vista que necessita aplicar testes de requisitos essenciais para a solução, como encontrar um topologia radial. Desta forma, para a topologia IEEE 14-Bus, o GAEnhanced gera 27 possíveis topologias, porém utiliza apenas 13 topologias para calcular a perda ativa após realizar os testes de restrição. A aplicação dos requisitos de restrição (verificar radialidade de topologia) aumenta o tempo computacional do algoritmo, e reduz as topologias válidas como solução, o que pode distanciar de um resultado ótimo em termos de encontrar um solução com perda de energia adequada.

Tabela 6.2: Quantidade de topologias verificadas na busca de solução

IEEE Topology	HATSGA	EGA
14-Bus	20	27 (13)
30-Bus	42	51 (21)
57-Bus	109	127 (59)
118-Bus	179	723 (96)
300-Bus	451	2266 (205)

Os resultados dos testes do tempo de computação dos algoritmos apresentados nas Tabelas 6.3 e 6.4, ressaltam que a abordagem heurística com otimização utilizada pelo HATSGA tende a ser melhor do que a abordagem genética realizada pelo algoritmo GAEnhanced para diversas topologias de rede. O tempo de computação torna-se relevante quando é necessário uma computação on-the-fly, sendo desta forma favorável a

utilização da heurística com otimização tanto para topologias de rede menores e quanto para topologias em larga escala, pois à sua capacidade de manipular as topologias escolhidas de forma mais eficiente (não aleatoriamente) procurando a melhor solução em conformidade com os parâmetros elétricos escolhidos, chegando a obter uma redução de tempo computacional em redes de larga escala de aproximadamente 25%.

Tabela 6.3: HATSGA Results

HATSGA						
Topology	Time Processor			Power Loss		
	Mean (in seconds)	Standard deviation	CI (95%)	Mean	Standard deviation	CI (95%)
IEEE 14-Bus	0.552	0.066	[0.539 : 0.565]	4.974	1.045	[4.767 : 5.182]
IEEE 30-Bus	2.379	0.192	[2.325 : 2.434]	7.547	1.179	[7.212 : 7.882]
IEEE 57-Bus	9.514	1.221	[8.639 : 10.388]	10.712	0.832	[10.117 : 11.307]
IEEE 118-Bus	43.232	5.830	[42.075 : 44.389]	57,377	4.499	[56.484 : 58.269]
IEEE 300-Bus	203.999	7.643	[201.55 : 206.44]	241.999	12.292	[238.06 : 245.93]

Ao considerar o desempenho geral e a qualidade da solução, o algoritmo HATSGA encontra uma melhor solução em relação ao GAEnhanced em termos de perda de energia (perda de energia 9.1% menor) com redução de aproximadamente 49.8% no tempo de computação para o teste de simulação IEEE 14-bus. A qualidade da solução é alcançada usando o elitismo em conjunto com o COH (*Cluster Optimization Heuristic*) que reduz o grau de aleatoriedade para o próximo conjunto de topologias calculadas.

Em geral, o algoritmo heurístico com otimização (HATSGA) obteve os seguintes resultados em termos de busca de espaço, tempo de execução e perda de energia em relação ao algoritmo GAEnhanced genético:

- Redução do espaço de busca em 25.9%, 17.6%, 14.1% , 75.2% e 80% para IEEE 14-bus, IEEE 30-bus, IEEE 57-bus, IEEE 118-bus e IEEE 300-bus respectiva-

Tabela 6.4: EGA Results

EGA						
Topology	Time Processor			Power Loss		
	Mean (in seconds)	Standard deviation	CI (95%)	Mean	Standard deviation	CI (95%)
IEEE 14-Bus	1.101	0.184	[0.971 : 1.231]	5.477	1.430	[4.469 : 6.484]
IEEE 30-Bus	3.112	0.110	[3.080 : 3.143]	8.594	1.183	[8.257 : 8.930]
IEEE 57-Bus	10.163	0.320	[9.933 : 10.392]	13.707	1.366	[12.730 : 14.684]
IEEE 118-Bus	55.902	0.958	[55.712 : 56.092]	58.778	2.782	[58.226 : 59.331]
IEEE 300-Bus	279.306	2.809	[278.25 : 280.35]	271.44	8.303	[268.3403 : 274.5415]

mente;

- Redução do tempo de computação em 49.8%, 23,5%, 6,4% e 22.6 % e 26.9% para IEEE 14-bus, IEEE 30-bus, IEEE 57-bus, IEEE 118-bus e IEEE 300-bus respectivamente; e
- Redução da perda de energia para as soluções em 9.1%, 12.1%, 21.9%, 2.3% e 10.8% para IEEE 14-bus, IEEE 30-bus, IEEE 57-bus, IEEE 118-bus e IEEE 300-bus, respectivamente.

O espaço de busca é reduzido em todos os cenários de teste quando a heurística com otimização é usada. Isso reflete o fato de que o HATSGA processa de forma mais eficiente as topologias geradas evitando o problema de aleatoriedade nas propostas de soluções.

O tempo de cálculo de HATSGA também é reduzido em comparação ao algoritmo GAEnhanced para todos os cenários de teste. Essa redução do tempo computacional respalda-se na diminuição do espaço de busca alcançado pelos algoritmos avaliados, e por prevenir testes desnecessários para o requisito de radialidade em topologias selecionadas.

A qualidade da solução, em termos de perda de energia, alcançada pelos algoritmos tem uma baixa variação. O HATSGA apresentou uma melhor solução para os todos os testes realizado. Esse resultado é pertinente ao método elitismo adotado por ambos os algoritmos influenciado a forma com a qual as diferentes topologias são avaliadas.

O HATSGA usa um método de seleção (elitismo) mais restrito do que o GAEnhanced para lidar com o número de topologias avaliadas. Esta análise de resultados também indica que o algoritmo heurístico com otimização HATSGA poderia eventualmente sacrificar algum tempo de computação adicional para ter uma população maior para a análise da qualidade da solução. Em resumo, há uma compensação clara entre espaço de busca e qualidade para ambos os algoritmos que podem ser ajustados de acordo com os resultados esperados em termos de tempo e qualidade de computação.

Na Tabela 6.5 é demonstrado o tempo computacional que a função utilizada no cálculo de perda de energia.

Tabela 6.5: Tempo computacional da função de perdas ativas

Topology	Power Loss Function (in seconds)
IEEE 14-Bus	0.021252
IEEE 30-Bus	0.043582
IEEE 57-Bus	0.067144
IEEE 118-Bus	0.185955
IEEE 300-Bus	0.348271

Levando em consideração o tempo computacional utilizado no cálculo de perda de energia ativa em conjunto com os dados da Tabela 6.2, é possível constatar que o algoritmo HATSGA consome aproximadamente 20% do tempo computacional na realização da busca combinatória em todas as topologias utilizadas.

Em contrapartida, no algoritmo EGA devido a dificuldade de encontrar topologias válidas (radiais) para o problema abordado, o tempo computacional é de 25%, 29%, 38%, 31% e 25% para IEEE 14-bus, IEEE 30-bus, IEEE 57-bus, IEEE 118-bus e IEEE 300-bus, respectivamente.

Neste ponto, é importante indicar que, embora os resultados da simulação sejam principalmente favoráveis em termos de redução do espaço de busca, tempo de computação e qualidade da solução para o algoritmo heurístico com otimização (HATSGA), existem alternativas que ainda podem ser consideradas pela abordagem genética que poderia melhorar seu desempenho em relação a apresentar uma solução com perdas de energias elétrica menores.

Uma possibilidade seria a aplicação de mais etapas de reprodução no algoritmo genético que poderia ser focado na melhoria da solução de qualidade. No entanto, a desvantagem desta abordagem é o aumento inerente da computabilidade do tempo.

Uma das principais vantagens dos algoritmos genéticos é que as soluções podem ser processadas em paralelo. Como tal, explorar o paralelismo, por exemplo, enfocando o elitismo (eventualmente com várias etapas), também seria uma alternativa possível para melhorar o desempenho dos algoritmos genéticos, no que tange ao tempo computacional. Esta última abordagem algorítmica mostra relevância especial para grandes redes de reconfiguração, como IEEE 118-bus e 300-bus. No entanto, ainda haverá alguma dependência da população inicial que, para algoritmos genéticos, é estocástica. Com efeito, a questão de encontrar as melhores soluções finais depende dos "bons pais iniciais", sendo este um aspecto potencial a ser investigado, cujo intuito é diminuir a aleatoriedade de filhos que não atendem aos requisitos de radialidade.

Em resumo, os resultados dos testes de simulação indicam a abordagem heurística com otimização mais adequada para o novo cenário de SG, pois aspectos importantes como o tempo computacional e a qualidade da solução atendendo aos requisitos (restrição de topologia radial).

Capítulo 7

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi discutido e comparado dois algoritmos de reconfiguração de rede elétrica com base em métodos heurísticos com a otimização (HATSGA) e com base em uma abordagem aprimorada de algoritmo genético (GAEnhanced) visando a reconfiguração da rede em novos cenários Smart Grid, cuja a computação rápida e a qualidade da solução proposta são requisitos fundamentais.

Os resultados dos testes de simulação indicam que ambas as estratégias algorítmicas tratam adequadamente a questão de escalabilidade da rede. Em suma, ambas as soluções podem lidar com um grande espaço de busca, adotando diferentes abordagens para reduzi-lo.

Por outro lado, a abordagem algorítmica baseada em heurística com otimização tende a ser mais rápida do que a abordagem genética quando o requisito de computabilidade do tempo é considerado. Neste ponto, um aspecto específico não explorado nesta avaliação é o paralelismo na abordagem genética que deve ser avaliado em trabalhos futuros.

A qualidade da solução obtida nesta avaliação sinaliza também um desempenho melhor ou equivalente para a abordagem heurística com otimização utilizada no HATSGA. No que tange a esse quesito, a vantagem inerente da abordagem heurística é que ele não precisa lidar com o comportamento estocástico existente na abordagem genética e,

como tal, o ajuste da qualidade da solução torna-se mais preciso e efetivo para um número aceitável de topologias avaliadas e tempo de computação. Como no caso anterior, a abordagem genética também pode ser estendida para lidar com a característica estocástica. A questão em fazer isso é o aumento no tempo de computação que, para novos cenários Smart Grid que demandem computação on-the-fly pode ser um problema.

As estratégias de algoritmos avaliadas (heurísticas e genéticas) podem potencialmente apoiar o desenvolvimento de soluções SG dinâmicas para redes grandes e complexas com eficiência. A abordagem heurística com otimização funciona melhor, mas as soluções genéticas podem ser aprimoradas em termos de otimização de implementação algorítmica para alcançar melhores resultados de desempenho.

Os resultados do teste de simulação, a computação de reconfiguração de rede (escalabilidade, tempo e qualidade) é alcançável no contexto Smart Grid com a perspectiva de implantar soluções mais autônomas e inteligentes inserindo funcionalidade nesses tipos de algoritmos voltados para automação de distribuição e sistemas de autocura.

Dessa forma, como sugestão de trabalho futuro, o algoritmo desenvolvido nesse trabalho pode ser testado em dados provenientes de outras fontes (concessionária de energia). Seria interessante analisar o impacto de novos operadores de seleção, cruzamento e mutação para o problema no desempenho do algoritmo GAEnhanced. Outra sugestão seria aprimorar o simulador, através da inserção de módulos de interface de linguagem de programação para possibilitar a utilização de código em outras linguagens de programação (Java, Matlab, C).

GLOSSÁRIO

ACO – *Otimização or Colônia de Formigas*

AE – *Algoritmos Evolucionários*

AG – *Algoritmos Genéticos*

AIS – *Sistemas Imunes Artificiais*

COH – *Cluster Optimization Heuristic*

DNRSim – *Simulador de Reconfiguração de Rede de Distribuição*

EPM – *Edge Parameters Matrix*

EP – *programação Evolucionária*

GAEnhanced – *Genetic Algorithm Enhanced*

HATSGA – *Hybrid Algorithm Tabu Search and Genetic Algorithm*

MST – *Minimum Spanning Tree*

MVR/D – *Método de Varredura Reversa/Direta*

PSO – *Otimização por Nuvem de Partículas*

SGA – *Algoritmo Genético Simples*

SG – *Smart Grid*

VPM – *Vortex Parameters Matrix*

Apendice A

DADOS PARA O SISTEMA IEEE 14 BUS

Os dados do sistema de ônibus IEEE 14 são retirados de <http://www.ee.washington.edu/research/pstca>. O sistema inclui 5 barramentos geradores, 9 barramentos de carga e 20 linhas de transmissão. A Figura A.1 mostra o diagrama de linha do sistema IEEE 14 bus. Dados de barramento e dados de linha são dados nas Tabelas A.1 e A.2, respectivamente.

Tabela A.1: Bus data para o sistema IEEE 14 bus

Bus Number	Bus Code	Voltage magnitude (p.u)	Voltage angle (degree)	P-Load (MW)	Q-Load (Mvar)	P-Gen (MW)	Q-Gen (Mvar)	Q_min (Mvar)	Q_max (Mvar)	Shunt Capacitance (Mvar)	V-min (p.u)	V-max (p.u)
1	1	1.060	0.0	0.0	0.0	232.4	-16.9	0.0	0.0	0	0	0
2	2	1.045	-4.98	21.7	12.7	40.0	42.4	-40.0	50.0	0	0	0
3	2	1.010	-12.72	94.2	19.0	0.0	23.4	0.0	40.0	0	0	0
4	0	1.019	-10.33	47.8	-3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
5	0	1.020	-8.78	7.6	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
6	2	1.070	-14.22	11.2	7.5	0.0	12.2	-6.0	24.0	0	0	0
7	0	1.062	-13.37	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
8	2	1.090	-13.36	0.0	0.0	0.0	17.4	-6.0	24.0	0	0	0
9	0	1.056	-14.94	29.5	16.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
10	0	1.051	-15.10	9.0	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
11	0	1.057	-14.79	3.5	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
12	0	1.055	-15.07	6.1	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
13	0	1.050	-15.16	13.5	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
14	0	1.036	-16.04	14.9	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0

Figura A.1: Sistema IEEE 14 bus.

Tabela A.2: Line data para o sistema IEEE 14 bus

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
1	2	0.01938	0.05917	0.0264	1
1	5	0.05403	0.22304	0.0246	1
2	3	0.04699	0.19797	0.0219	1
2	4	0.05811	0.17632	0.0187	1
2	5	0.05695	0.17388	0.0170	1
3	4	0.06701	0.17103	0.0173	1
4	5	0.01335	0.04211	0.0064	1
4	7	0.00000	0.20912	0.0000	0.9780
4	9	0.00000	0.55618	0.0000	0.9690
5	6	0.00000	0.25202	0.0000	0.9620
6	11	0.09498	0.19890	0.0000	1

Table A.2 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
6	12	0.12291	0.25581	0.0000	1
6	13	0.06615	0.13027	0.0000	1
7	8	0.00000	0.17615	0.0000	1
7	9	0.00000	0.11001	0.0000	1
9	10	0.03181	0.08450	0.0000	1
9	14	0.12711	0.27038	0.0000	1
10	11	0.08205	0.19207	0.0000	1
12	13	0.22092	0.19988	0.0000	1
13	14	0.17093	0.34802	0.0000	1

Apêndice B

DADOS PARA O SISTEMA IEEE 30 BUS

Os dados do sistema IEEE 30 bus são retirados de <http://www.ee.washington.edu/research/pstca>. O sistema inclui 6 barramentos geradores, 24 barramentos de carga e 41 linhas de transmissão. A Figura B.1 mostra o diagrama de linha do sistema IEEE 30 bus. Dados dos barramentos e dados de linha são dados nas Tabelas B.1 e B.2, respectivamente.

Figura B.1: Sistema IEEE 30 bus.

Tabela B.1: Bus data para o sistema IEEE 30 bus

Bus Number	Bus Code	Voltage magnitude (p.u)	Voltage angle (degree)	P-Load (MW)	Q-Load (Mvar)	P-Gen (MW)	Q-Gen (Mvar)	Q_min (Mvar)	Q_max (Mvar)	Shunt Capacitance (Mvar)	V-min (p.u)	V-max (p.u)
1	1	1.060	0.0	0.0	0.0	260.2	-16.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0
2	2	1.043	-5.48	21.7	12.7	40.0	50.0	-40.0	50.0	0.0	0.0	0
3	0	1.021	-7.96	2.4	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
4	0	1.012	-9.62	7.6	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
5	2	1.010	-14.37	94.2	19.0	0.0	37.0	-40.0	40.0	0.0	0.0	0
6	0	1.010	-11.34	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
7	0	1.002	-13.12	22.8	10.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
8	2	1.010	-12.10	30.0	30.0	0.0	37.3	-10.0	40.0	0.0	0.0	0
9	0	1.051	-14.38	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
10	0	1.045	-15.97	5.8	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.19	0
11	2	1.082	-14.39	0.0	0.0	0.0	16.2	-6.0	24.0	0.0	0.0	0
12	0	1.057	-15.24	11.2	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
13	2	1.071	-15.24	0.0	0.0	0.0	10.6	-6.0	24.0	0.0	0.0	0
14	0	1.042	-16.13	6.2	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
15	0	1.038	-16.22	8.2	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
16	0	1.045	-15.83	3.5	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
17	0	1.040	-16.14	9.0	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
18	0	1.028	-16.82	3.2	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
19	0	1.026	-17.00	9.5	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
20	0	1.030	-16.80	2.2	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
21	0	1.033	-16.42	17.5	11.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
22	0	1.033	-16.41	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
23	0	1.027	-16.61	3.2	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
24	0	1.021	-16.78	8.7	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.043	0
25	0	1.017	-16.35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
26	0	1.000	-16.77	3.5	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
27	0	1.023	-15.82	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
28	0	1.007	-11.97	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
29	0	1.003	-17.06	2.4	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
30	0	0.992	-17.94	10.6	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0

Tabela B.2: Line data para o sistema IEEE 30 bus

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Charging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
1	2	0.0192	0.0575	0.0264	1.0
1	3	0.0452	0.1652	0.0204	1.0
2	4	0.0570	0.1737	0.0184	1.0
3	4	0.0132	0.0379	0.0042	1.0
2	5	0.0472	0.1983	0.0209	1.0
2	6	0.0581	0.1763	0.0187	1.0

Table B.2 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
4	6	0.0119	0.0414	0.0045	1.0
5	7	0.0460	0.1160	0.0102	1.0
6	7	0.0267	0.0820	0.085	1.0
6	8	0.0120	0.0420	0.0045	1.0
6	9	0.0	0.2080	0.0	0.978
6	10	0.0	0.5560	0.0	0.969
9	11	0.0	0.2080	0.0	1.0
9	10	0.0	0.1100	0.0	1.0
4	12	0.0	0.2560	0.0	0.932
12	13	0.0	0.1400	0.0	1.0
12	14	0.1231	0.2559	0.0	1.0
12	15	0.0662	0.1304	0.0	1.0
12	16	0.0945	0.1987	0.0	1.0
14	15	0.2210	0.1997	0.0	1.0
16	17	0.0524	0.1923	0.0	1.0
15	18	0.1073	0.2185	0.0	1.0
18	19	0.0639	0.1292	0.0	1.0
19	20	0.0340	0.0680	0.0	1.0
10	20	0.0936	0.2090	0.0	1.0
10	17	0.0324	0.0845	0.0	1.0
10	21	0.0348	0.0749	0.0	1.0
10	22	0.0727	0.1499	0.0	1.0
21	22	0.0116	0.0236	0.0	1.0
15	23	0.1000	0.2020	0.0	1.0
22	24	0.1150	0.1790	0.0	1.0

Table B.2 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
23	24	0.1320	0.2700	0.0	1.0
24	25	0.1885	0.3292	0.0	1.0
25	26	0.2544	0.3800	0.0	1.0
25	27	0.1093	0.2087	0.0	1.0
28	27	0.0	0.3960	0.0	0.968
27	29	0.2198	0.4153	0.0	1.0
27	30	0.3202	0.6027	0.0	1.0
29	30	0.2399	0.4533	0.0	1.0
8	28	0.0636	0.2000	0.0428	1.0
6	28	0.0169	0.0599	0.0130	1.0

Apendice C

DADOS PARA O SISTEMA IEEE 57 BUS

Os dados do sistema IEEE 57 bus são retirados de [http://www.ee.washington.edu / research / pstca](http://www.ee.washington.edu/research/pstca). O sistema inclui 7 barramentos geradores, 42 barramentos de carga e 80 linhas de transmissão. A Figura C.1 mostra o diagrama de linha do sistema IEEE 57 bus. Dados dos barramentos e dados de linha são dados nas Tabelas C.1 e C.2, respectivamente.

Tabela C.2: Line data para o sistema IEEE 57 bus

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
1	2	0.0083	0.0280	0.1290	1.0
2	3	0.0298	0.0850	0.0818	1.0
3	4	0.0112	0.0366	0.0380	1.0
4	5	0.0625	0.1320	0.0258	1.0
4	6	0.0430	0.1480	0.0348	1.0
6	7	0.0200	0.1020	0.0276	1.0
6	8	0.0339	0.1730	0.0470	1.0
8	9	0.0099	0.0505	0.0548	1.0

Table C.2 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
9	10	0.0369	0.1679	0.0440	1.0
9	11	0.0258	0.0848	0.0218	1.0
9	12	0.0648	0.2950	0.0772	1.0
9	13	0.0481	0.1580	0.0406	1.0
13	14	0.0132	0.0434	0.0110	1.0
13	15	0.0269	0.0869	0.0230	1.0
1	15	0.0178	0.0910	0.0988	1.0
1	16	0.0454	0.2060	0.0546	1.0
1	17	0.0238	0.1080	0.0286	1.0
3	15	0.0162	0.0530	0.0544	1.0
4	18	0.0	0.5550	0.0	0.970
4	18	0.0	0.4300	0.0	0.978
5	6	0.0302	0.0641	0.0124	1.0
7	8	0.0139	0.0712	0.0194	1.0
10	12	0.0277	0.1262	0.0328	1.0
11	13	0.0223	0.0732	0.0188	1.0
12	13	0.0178	0.0580	0.0604	1.0
12	16	0.0180	0.0813	0.0216	1.0
12	17	0.0397	0.1790	0.0476	1.0
14	15	0.0171	0.0547	0.0148	1.0
18	19	0.4610	0.6850	0.0	1.0
19	20	0.2830	0.4340	0.0	1.0
21	20	0.0	0.7767	0.0	0.043
21	22	0.0736	0.1170	0.0	1.0
22	23	0.0099	0.0152	0.0	1.0

Table C.2 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
23	24	0.1660	0.2560	0.0084	1.0
24	25	0.0	1.1820	0.0	0.000
24	25	0.0	1.2300	0.0	0.000
24	26	0.0	0.0473	0.0	0.043
26	27	0.1650	0.2540	0.0	1.0
27	28	0.0618	0.0954	0.0	1.0
28	29	0.0418	0.0587	0.0	1.0
7	29	0.0	0.0648	0.0	0.967
25	30	0.1350	0.2020	0.0	1.0
30	31	0.3260	0.4970	0.0	1.0
31	32	0.5070	0.7550	0.0	1.0
32	33	0.0392	0.0360	0.0	1.0
34	32	0.0	0.9530	0.0	0.975
34	35	0.0520	0.0780	0.0032	1.0
35	36	0.0430	0.0537	0.0016	1.0
36	37	0.0290	0.0366	0.0	1.0
37	38	0.0651	0.1009	0.0020	1.0
37	39	0.0239	0.0379	0.0	1.0
36	40	0.0300	0.0466	0.0	1.0
22	38	0.0192	0.0295	0.0	1.0
11	41	0.0	0.7490	0.0	0.955
41	42	0.2070	0.3520	0.0	1.0
41	43	0.0	0.4120	0.0	1.0
38	44	0.0289	0.0585	0.0020	1.0
15	45	0.0	0.1042	0.0	0.955

Table C.2 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
14	46	0.0	0.0735	0.0	0.900
46	47	0.0230	0.0680	0.0032	1.0
47	48	0.0182	0.0233	0.0	1.0
48	49	0.0834	0.1290	0.0048	1.0
49	50	0.0801	0.1280	0.0	1.0
50	51	0.1386	0.2200	0.0	1.0
10	51	0.0	0.0712	0.0	0.930
13	49	0.0	0.1910	0.0	0.895
29	52	0.1442	0.1870	0.0	1.0
52	53	0.0762	0.0984	0.0	1.0
53	54	0.1878	0.2320	0.0	1.0
54	55	0.1732	0.2265	0.0	1.0
11	43	0.0	0.1530	0.0	0.958
44	45	0.0624	0.1242	0.0040	1.0
40	56	0.0	1.1950	0.0	0.958
56	41	0.5530	0.5490	0.0	1.0
56	42	0.2125	0.3540	0.0	1.0
39	57	0.0	1.3550	0.0	0.980
57	56	0.1740	0.2600	0.0	1.0
38	49	0.1150	0.1770	0.0030	1.0
38	48	0.0312	0.0482	0.0	1.0
9	55	0.0	0.1205	0.0	0.940

Tabela C.1: Bus data para o sistema IEEE 57 bus

Bus Number	Bus Code	Voltage magnitude (p.u)	Voltage angle (degree)	P-Load (MW)	Q-Load (Mvar)	P-Gen (MW)	Q-Gen (Mvar)	Q_min (Mvar)	Q_max (Mvar)	Shunt Capacitance (Mvar)	V-min (p.u)	V-max (p.u)
1	1	1.040	0.0	55.0	17.0	575.88	-16.1	-140	200	0	0	0
2	2	1.010	-1.18	3.0	88.0	0.0	-0.8	-17.0	50.0	0	0	0
3	2	0.985	-5.97	41.0	21.0	40.0	-1.0	-10.0	60.0	0	0	0
4	0	0.981	-7.32	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
5	0	0.976	-8.52	13.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
6	2	0.980	-8.65	75.0	2.0	0.0	0.8	-8.0	25.0	0	0	0
7	0	0.984	-7.58	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
8	2	1.005	-4.45	150.0	22.0	450.0	62.1	-140.0	200.0	0	0	0
9	2	0.980	-9.56	121.0	26.0	0.0	2.2	-3.0	9.0	0	0	0
10	0	0.986	-11.43	5.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
11	0	0.974	-10.17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
12	2	1.015	-10.46	377.0	24.0	310.0	128.5	-150.0	155.0	0	0	0
13	0	0.979	-9.79	18.0	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
14	0	0.970	-9.33	10.5	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
15	0	0.988	-7.18	22.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
16	0	1.013	-8.85	43.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
17	0	1.017	-5.39	42.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
18	0	1.001	-11.71	27.2	9.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
19	0	0.970	-13.20	3.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
20	0	0.964	-13.41	2.3	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
21	0	1.008	-12.89	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
22	0	1.010	-12.84	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
23	0	1.008	-12.91	6.3	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
24	0	0.999	-13.25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
25	0	0.982	-18.13	6.3	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
26	0	0.959	-12.95	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
27	0	0.982	-11.48	9.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
28	0	0.997	-10.45	4.6	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
29	0	1.010	-9.75	17.0	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
30	0	0.962	-18.68	3.6	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
31	0	0.936	-19.34	5.8	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
32	0	0.949	-18.46	1.6	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
33	0	0.947	-18.50	3.8	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
34	0	0.959	-14.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
35	0	0.966	-13.86	6.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
36	0	0.976	-13.59	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
37	0	0.985	-13.41	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
38	0	1.013	-12.71	14.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
39	0	0.983	-13.46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
40	0	0.973	-13.62	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
41	0	0.996	-14.05	6.3	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
42	0	0.966	-15.50	7.1	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
43	0	1.010	-11.33	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
44	0	1.017	-11.86	12.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
45	0	1.036	-9.25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
46	0	1.050	-11.89	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
47	0	1.033	-12.49	29.7	11.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
48	0	1.027	-12.59	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
49	0	1.036	-12.92	18.0	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
50	0	1.023	-13.39	21.0	10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
51	0	1.052	-12.52	18.0	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
52	0	0.980	-11.47	4.9	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
53	0	0.971	-12.23	20.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
54	0	0.996	-11.69	4.1	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
55	0	1.031	-10.78	6.8	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
56	0	0.968	-16.04	7.6	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
57	0	0.965	-16.56	6.7	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0

Apendice D

DADOS PARA O SISTEMA IEEE 118 BUS

Os dados do sistema IEEE 57 bus são retirados de <http://www.ee.washington.edu/research/pstca>. Este caso de teste consiste em 19 barramentos geradores, 35 condensadores síncronos, 177 linhas de transmissão, 9 transformadores e 91 barramentos de carga. A Figura D.1 mostra o diagrama de linha do sistema IEEE 118 bus. Dados dos barramentos e dados de linha são dados nas Tabelas D.1 e D.3, respectivamente.

Tabela D.3: Line data para o sistema IEEE 118 bus

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
1	2	0.03030	0.09990	0.02540	0.0
1	3	0.01290	0.04240	0.01082	0.0
4	5	0.00176	0.00798	0.00210	0.0
3	5	0.02410	0.10800	0.02840	0.0
5	6	0.01190	0.05400	0.01426	0.0
6	7	0.00459	0.02080	0.00550	0.0
8	9	0.00244	0.03050	1.16200	0.0
8	5	0.00000	0.02670	0.0	0.985

Table D.3 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
9	10	0.00258	0.03220	1.23000	0.0
4	11	0.02090	0.06880	0.01748	0.0
5	11	0.02030	0.06820	0.01738	0.0
11	12	0.00595	0.01960	0.00502	0.0
2	12	0.01870	0.06160	0.01572	0.0
3	12	0.04840	0.16000	0.04060	0.0
7	12	0.00862	0.03400	0.00874	0.0
11	13	0.02225	0.07310	0.01876	0.0
12	14	0.02150	0.07070	0.01816	0.0
13	15	0.07440	0.24440	0.06268	0.0
14	15	0.05950	0.19500	0.05020	0.0
12	16	0.02120	0.08340	0.02140	0.0
15	17	0.01320	0.04370	0.04440	0.0
16	17	0.04540	0.18010	0.04660	0.0
17	18	0.01230	0.05050	0.01298	0.0
18	19	0.01119	0.04930	0.01142	0.0
19	20	0.02520	0.11700	0.02980	0.0
15	19	0.01200	0.03940	0.01010	0.0
20	21	0.01830	0.08490	0.02160	0.0
21	22	0.02090	0.09700	0.02460	0.0
22	23	0.03420	0.15900	0.04040	0.0
23	24	0.01350	0.04920	0.04980	0.0
23	25	0.01560	0.08000	0.08640	0.0
26	25	0.00000	0.03820	0.0	0.960
25	27	0.03180	0.16300	0.17640	0.0

Table D.3 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
27	28	0.01913	0.08550	0.02160	0.0
28	29	0.02370	0.09430	0.02380	0.0
30	17	0.00000	0.03880	0.0	0.960
8	30	0.00431	0.05040	0.51400	0.0
26	30	0.00799	0.08600	0.90800	0.0
17	31	0.04740	0.15630	0.03990	0.0
29	31	0.01080	0.03310	0.00830	0.0
23	32	0.03170	0.11530	0.11730	0.0
31	32	0.02980	0.09850	0.02510	0.0
27	32	0.02290	0.07550	0.01926	0.0
15	33	0.03800	0.12440	0.03194	0.0
19	34	0.07520	0.24700	0.06320	0.0
35	36	0.00224	0.01020	0.00268	0.0
35	37	0.01100	0.04970	0.01318	0.0
33	37	0.04150	0.14200	0.03660	0.0
34	36	0.00871	0.02680	0.00568	0.0
34	37	0.00256	0.00940	0.00984	0.0
38	37	0.00000	0.03750	0.0	0.935
37	39	0.03210	0.10600	0.02700	0.0
37	40	0.05930	0.16800	0.04200	0.0
30	38	0.00464	0.05400	0.42200	0.0
39	40	0.01840	0.06050	0.01552	0.0
40	41	0.01450	0.04870	0.01222	0.0
40	42	0.05550	0.18300	0.04660	0.0
41	42	0.04100	0.13500	0.03440	0.0

Table D.3 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
43	44	0.06080	0.24540	0.06068	0.0
34	43	0.04130	0.16810	0.04226	0.0
44	45	0.02240	0.09010	0.02240	0.0
45	46	0.04000	0.13560	0.03320	0.0
46	47	0.03800	0.12700	0.03160	0.0
46	48	0.06010	0.18900	0.04720	0.0
47	49	0.01910	0.06250	0.01604	0.0
42	49	0.07150	0.32300	0.08600	0.0
42	49	0.07150	0.32300	0.08600	0.0
45	49	0.06840	0.18600	0.04440	0.0
48	49	0.01790	0.05050	0.01258	0.0
49	50	0.02670	0.07520	0.01874	0.0
49	51	0.04860	0.13700	0.03420	0.0
51	52	0.02030	0.05880	0.01396	0.0
52	53	0.04050	0.16350	0.04058	0.0
53	54	0.02630	0.12200	0.03100	0.0
49	54	0.07300	0.28900	0.07380	0.0
49	54	0.08690	0.29100	0.07300	0.0
54	55	0.01690	0.07070	0.02020	0.0
54	56	0.00275	0.00955	0.00732	0.0
55	56	0.00488	0.01510	0.00374	0.0
56	57	0.03430	0.09660	0.02420	0.0
50	57	0.04740	0.13400	0.03320	0.0
56	58	0.03430	0.09660	0.02420	0.0
51	58	0.02550	0.07190	0.01788	0.0

Table D.3 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
54	59	0.05030	0.22930	0.05980	0.0
56	59	0.08250	0.25100	0.05690	0.0
56	59	0.08030	0.23900	0.05360	0.0
55	59	0.04739	0.21580	0.05646	0.0
59	60	0.03170	0.14500	0.03760	0.0
59	61	0.03280	0.15000	0.03880	0.0
60	61	0.00264	0.01350	0.01456	0.0
60	62	0.01230	0.05610	0.01468	0.0
61	62	0.00824	0.03760	0.00980	0.0
63	59	0.00000	0.03860	0.0	0.960
63	64	0.00172	0.02000	0.21600	0.0
64	61	0.00000	0.02680	0.0	0.985
38	65	0.00901	0.09860	1.04600	0.0
64	65	0.00269	0.03020	0.38000	0.0
49	66	0.01800	0.09190	0.02480	0.0
49	66	0.01800	0.09190	0.02480	0.0
62	66	0.04820	0.21800	0.05780	0.0
62	67	0.02580	0.11700	0.03100	0.0
65	66	0.00000	0.03700	0.0	0.935
66	67	0.02240	0.10150	0.02682	0.0
65	68	0.00138	0.01600	0.63800	0.0
47	69	0.08440	0.27780	0.07092	0.0
49	69	0.09850	0.32400	0.08280	0.0
68	69	0.00000	0.03700	0.0	0.935
69	70	0.03000	0.12700	0.12200	0.0

Table D.3 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
24	70	0.00221	0.41150	0.10198	0.0
70	71	0.00882	0.03550	0.00878	0.0
24	72	0.04880	0.19600	0.04880	0.0
71	72	0.04460	0.18000	0.04444	0.0
71	73	0.00866	0.04540	0.01178	0.0
70	74	0.04010	0.13230	0.03368	0.0
70	75	0.04280	0.14100	0.03600	0.0
69	75	0.04050	0.12200	0.12400	0.0
74	75	0.01230	0.04060	0.01034	0.0
76	77	0.04440	0.14800	0.03680	0.0
69	77	0.03090	0.10100	0.10380	0.0
75	77	0.06010	0.19990	0.04978	0.0
77	78	0.00376	0.01240	0.01264	0.0
78	79	0.00546	0.02440	0.00648	0.0
77	80	0.01700	0.04850	0.04720	0.0
77	80	0.02940	0.10500	0.02280	0.0
79	80	0.01560	0.07040	0.01870	0.0
68	81	0.00175	0.02020	0.80800	0.0
81	80	0.00000	0.03700	0.0	0.935
77	82	0.02980	0.08530	0.08174	0.0
82	83	0.01120	0.03665	0.03796	0.0
83	84	0.06250	0.13200	0.02580	0.0
83	85	0.04300	0.14800	0.03480	0.0
84	85	0.03020	0.06410	0.01234	0.0
85	86	0.03500	0.12300	0.02760	0.0

Table D.3 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
86	87	0.02828	0.20740	0.04450	0.0
85	88	0.02000	0.10200	0.02760	0.0
85	89	0.02390	0.17300	0.04700	0.0
88	89	0.01390	0.07120	0.01934	0.0
89	90	0.05180	0.18800	0.05280	0.0
89	90	0.02380	0.09970	0.10600	0.0
90	91	0.02540	0.08360	0.02140	0.0
89	92	0.00990	0.05050	0.05480	0.0
89	92	0.03930	0.15810	0.04140	0.0
91	92	0.03870	0.12720	0.03268	0.0
92	93	0.02580	0.08480	0.02180	0.0
92	94	0.04810	0.15800	0.04060	0.0
93	94	0.02230	0.07320	0.01876	0.0
94	95	0.01320	0.04340	0.01110	0.0
80	96	0.03560	0.18200	0.04940	0.0
82	96	0.01620	0.05300	0.05440	0.0
94	96	0.02690	0.08690	0.02300	0.0
80	97	0.01830	0.09340	0.02540	0.0
80	98	0.02380	0.10800	0.02860	0.0
80	99	0.04540	0.20600	0.05460	0.0
92	100	0.06480	0.29500	0.04720	0.0
94	100	0.01780	0.05800	0.06040	0.0
95	96	0.01710	0.05470	0.01474	0.0
96	97	0.01730	0.08850	0.02400	0.0
98	100	0.03970	0.17900	0.04760	0.0

Table D.3 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
99	100	0.01800	0.08130	0.02160	0.0
100	101	0.02770	0.12620	0.03280	0.0
92	102	0.01230	0.05590	0.01464	0.0
101	102	0.02460	0.11200	0.02940	0.0
100	103	0.01600	0.05250	0.05360	0.0
100	104	0.04510	0.20400	0.05410	0.0
103	104	0.04660	0.15840	0.04070	0.0
103	105	0.05350	0.16250	0.04080	0.0
100	106	0.06050	0.22900	0.06200	0.0
104	105	0.00994	0.03780	0.00986	0.0
105	106	0.01400	0.05470	0.01434	0.0
105	107	0.05300	0.18300	0.04720	0.0
105	108	0.02610	0.07030	0.01844	0.0
106	107	0.05300	0.18300	0.04720	0.0
108	109	0.01050	0.02880	0.00760	0.0
103	110	0.03906	0.18130	0.04610	0.0
109	110	0.02780	0.07620	0.02020	0.0
110	111	0.02200	0.07550	0.02000	0.0
110	112	0.02470	0.06400	0.06200	0.0
17	113	0.00913	0.03010	0.00768	0.0
32	113	0.06150	0.20300	0.05180	0.0
32	114	0.01350	0.06120	0.01628	0.0
27	115	0.01640	0.07410	0.01972	0.0
114	115	0.00230	0.01040	0.00276	0.0
68	116	0.00034	0.00405	0.16400	0.0

Table D.3 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
12	117	0.03290	0.14000	0.03580	0.0
75	118	0.01450	0.04810	0.01198	0.0
76	118	0.01640	0.05440	0.01356	0.0

Figura D.1: Sistema IEEE 118 bus.

Tabela D.2: Table D.1 continued from previous page

Bus Number	Bus Code	Voltage magnitude (p.u)	Voltage angle (degree)	P-Load (MW)	Q-Load (Mvar)	P-Gen (MW)	Q-Gen (Mvar)	Q_min (Mvar)	Q_max (Mvar)	Shunt Capacitance (Mvar)	V-min (p.u)	V-max (p.u)
65	2	1.005	27.65	0.0	0.0	391.0	0.0	200.0	-67.0	0	0	0
66	2	1.050	27.48	39.0	18.0	392.0	0.0	200.0	-67.0	0	0	0
67	0	1.020	24.84	28.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
68	0	1.003	27.55	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
69	3	1.035	30.00	0.0	0.0	516.4	0.0	300.0	-300.0	0	0	0
70	2	0.984	22.58	66.0	20.0	0.0	0.0	32.0	-10.0	0	0	0
71	0	0.987	22.15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
72	2	0.980	20.98	0.0	0.0	-12.0	0.0	100.0	-100.0	0	0	0
73	2	0.991	21.94	0.0	0.0	-6.0	0.0	100.0	-100.0	0	0	0
74	2	0.958	21.64	68.0	27.0	0.0	0.0	9.0	-6.0	0	0	0
75	0	0.967	22.91	47.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
76	2	0.943	21.77	68.0	36.0	0.0	0.0	23.0	-8.0	0	0	0
77	2	1.006	26.72	61.0	28.0	0.0	0.0	70.0	-20.0	0	0	0
78	0	1.003	26.42	71.0	26.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
79	0	1.009	26.72	39.0	32.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
80	2	1.040	28.96	130.0	26.0	477.0	0.0	280.0	-165.0	0	0	0
81	0	0.997	28.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
82	0	0.989	27.24	54.0	27.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
83	0	0.985	28.42	20.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
84	0	0.980	30.95	11.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
85	2	0.985	32.51	24.0	15.0	0.0	0.0	23.0	-8.0	0	0	0
86	0	0.987	31.14	21.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
87	2	1.015	31.40	0.0	0.0	4.0	0.0	1000.0	-100.0	0	0	0
88	0	0.987	35.64	48.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
89	2	1.005	39.69	0.0	0.0	607.0	0.0	300.0	-210.0	0	0	0
90	2	0.985	33.29	78.0	42.0	-85.0	0.0	300.0	-300.0	0	0	0
91	2	0.980	33.31	0.0	0.0	-10.0	0.0	100.0	-100.0	0	0	0
92	2	0.993	33.80	65.0	10.0	0.0	0.0	9.0	-3.0	0	0	0
93	0	0.987	30.79	12.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
94	0	0.991	28.64	30.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
95	0	0.981	27.67	42.0	31.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
96	0	0.993	27.51	38.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
97	0	1.011	27.88	15.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
98	0	1.024	27.40	34.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
99	2	1.010	27.04	0.0	0.0	-42.0	0.0	100.0	-100.0	0	0	0
100	2	1.017	28.03	37.0	18.0	252.0	0.0	155.0	-50.0	0	0	0
101	0	0.993	29.61	22.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
102	0	0.991	32.30	5.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
103	2	1.001	24.44	23.0	16.0	40.0	0.0	40.0	-15.0	0	0	0
104	2	0.971	21.69	38.0	25.0	0.0	0.0	23.0	-8.0	0	0	0
105	2	0.965	20.57	31.0	26.0	0.0	0.0	23.0	-8.0	0	0	0
106	0	0.962	20.32	43.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
107	2	0.952	17.53	28.0	12.0	-22.0	0.0	200.0	-200.0	0	0	0
108	0	0.967	19.38	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
109	0	0.967	18.93	8.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
110	2	0.973	18.09	39.0	30.0	0.0	0.0	23.0	-8.0	0	0	0
111	2	0.980	19.74	0.0	0.0	36.0	0.0	1000.0	-100.0	0	0	0
112	2	0.975	14.99	25.0	13.0	-43.0	0.0	1000.0	-100.0	0	0	0
113	2	0.993	13.74	0.0	0.0	-6.0	0.0	200.0	-100.0	0	0	0
114	0	0.960	14.46	8.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
115	0	0.960	14.46	22.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
116	2	1.005	27.12	0.0	0.0	-184.0	0.0	1000.0	-1000.0	0	0	0
117	0	0.974	10.67	20.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0
118	0	0.949	21.92	33.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0

Apêndice E

DADOS PARA O SISTEMA IEEE 300 BUS

Os dados do sistema IEEE 300 bus são retirados de <http://www.ee.washington.edu/research/pstca>. Este sistema IEEE 300-bus contém 69 geradores, 60 LTCs, 304 linhas de transmissão e 195 barramentos de carga. A Figura E.1 mostra o diagrama de linha do sistema IEEE 300 bus. Dados dos barramentos e dados de linha são dados nas Tabelas E.1 e E.6, respectivamente.

Tabela E.6: Line data para o sistema IEEE 300 bus

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
37	9001	0.000060	0.000460	0.00000	1.0082
9001	9005	0.000800	0.003480	0.00000	0.0000
9001	9006	0.024390	0.436820	0.00000	0.9668
9001	9012	0.036240	0.648980	0.00000	0.9796
9005	9051	0.015780	0.374860	0.00000	1.0435
9005	9052	0.015780	0.374860	0.00000	0.9391
9005	9053	0.016020	0.380460	0.00000	1.0435
9005	9054	0.000000	0.152000	0.00000	1.0435

Table E.6 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
9005	9055	0.000000	0.800000	0.00000	1.0435
9006	9007	0.055580	0.246660	0.00000	0.0000
9006	9003	0.111180	0.493320	0.00000	0.0000
9006	9003	0.111180	0.493320	0.00000	0.0000
9012	9002	0.076220	0.432860	0.00000	0.0000
9012	9002	0.076220	0.432860	0.00000	0.0000
9002	9021	0.053700	0.070260	0.00000	0.0000
9021	9023	1.106800	0.952780	0.00000	0.0000
9021	9022	0.443640	2.815200	0.00000	1.0000
9002	9024	0.507480	3.220200	0.00000	1.0000
9023	9025	0.666880	3.944000	0.00000	1.0000
9023	9026	0.611300	3.615200	0.00000	1.0000
9007	9071	0.441200	2.966800	0.00000	1.0000
9007	9072	0.307920	2.057000	0.00000	1.0000
9007	9003	0.055800	0.246660	0.00000	0.0000
9003	9031	0.736330	4.672400	0.00000	1.0000
9003	9032	0.769780	4.884600	0.00000	1.0000
9003	9033	0.757320	4.805600	0.00000	1.0000
9003	9044	0.073780	0.063520	0.00000	0.0000
9044	9004	0.038320	0.028940	0.00000	0.0000
9004	9041	0.366140	2.456000	0.00000	1.0000
9004	9042	1.059300	5.453600	0.00000	1.0000
9004	9043	0.156700	1.699400	0.00000	1.0000
9003	9034	0.130060	1.391200	0.00000	1.0000
9003	9035	0.544840	3.457200	0.00000	1.0000

Table E.6 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
9003	9036	0.154260	1.672900	0.00000	1.0000
9003	9037	0.384900	2.571200	0.00000	1.0000
9003	9038	0.441200	2.966800	0.00000	1.0000
9012	9121	0.235520	0.990360	0.00000	0.0000
9053	9533	0.000000	0.750000	0.00000	0.9583
1	5	0.001000	0.006000	0.00000	0.0000
2	6	0.001000	0.009000	0.00000	0.0000
2	8	0.006000	0.027000	0.05400	0.0000
3	7	0.000000	0.003000	0.00000	0.0000
3	19	0.008000	0.069000	0.13900	0.0000
3	150	0.001000	0.007000	0.00000	0.0000
4	16	0.002000	0.019000	1.12700	0.0000
5	9	0.006000	0.029000	0.01800	0.0000
7	12	0.001000	0.009000	0.07000	0.0000
7	131	0.001000	0.007000	0.01400	0.0000
8	11	0.013000	0.059500	0.03300	0.0000
8	14	0.013000	0.042000	0.08100	0.0000
9	11	0.006000	0.027000	0.01300	0.0000
11	13	0.008000	0.034000	0.01800	0.0000
12	21	0.002000	0.015000	0.11800	0.0000
13	20	0.006000	0.034000	0.01600	0.0000
14	15	0.014000	0.042000	0.09700	0.0000
15	37	0.065000	0.248000	0.12100	0.0000
15	89	0.099000	0.248000	0.03500	0.0000
15	90	0.096000	0.363000	0.04800	0.0000

Table E.6 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
16	42	0.002000	0.022000	1.28000	0.0000
19	21	0.002000	0.018000	0.03600	0.0000
19	87	0.013000	0.080000	0.15100	0.0000
20	22	0.016000	0.033000	0.01500	0.0000
20	27	0.069000	0.186000	0.09800	0.0000
21	24	0.004000	0.034000	0.28000	0.0000
22	23	0.052000	0.111000	0.05000	0.0000
23	25	0.019000	0.039000	0.01800	0.0000
24	319	0.007000	0.068000	0.13400	0.0000
25	26	0.036000	0.071000	0.03400	0.0000
26	27	0.045000	0.120000	0.06500	0.0000
26	320	0.043000	0.130000	0.01400	0.0000
33	34	0.000000	0.063000	0.00000	0.0000
33	38	0.002500	0.012000	0.01300	0.0000
33	40	0.006000	0.029000	0.02000	0.0000
33	41	0.007000	0.043000	0.02600	0.0000
34	42	0.001000	0.008000	0.04200	0.0000
35	72	0.012000	0.060000	0.00800	0.0000
35	76	0.006000	0.014000	0.00200	0.0000
35	77	0.010000	0.029000	0.00300	0.0000
36	88	0.004000	0.027000	0.04300	0.0000
37	38	0.008000	0.047000	0.00800	0.0000
37	40	0.022000	0.064000	0.00700	0.0000
37	41	0.010000	0.036000	0.02000	0.0000
37	49	0.017000	0.081000	0.04800	0.0000

Table E.6 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
37	89	0.102000	0.254000	0.03300	0.0000
37	90	0.047000	0.127000	0.01600	0.0000
38	41	0.008000	0.037000	0.02000	0.0000
38	43	0.032000	0.087000	0.04000	0.0000
39	42	0.000600	0.006400	0.40400	0.0000
40	48	0.026000	0.154000	0.02200	0.0000
41	42	0.000000	0.029000	0.00000	0.0000
41	49	0.065000	0.191000	0.02000	0.0000
41	51	0.031000	0.089000	0.03600	0.0000
42	46	0.002000	0.014000	0.80600	0.0000
43	44	0.026000	0.072000	0.03500	0.0000
43	48	0.095000	0.262000	0.03200	0.0000
43	53	0.013000	0.039000	0.01600	0.0000
44	47	0.027000	0.084000	0.03900	0.0000
44	54	0.028000	0.084000	0.03700	0.0000
45	60	0.007000	0.041000	0.31200	0.0000
45	74	0.009000	0.054000	0.41100	0.0000
46	81	0.005000	0.042000	0.69000	0.0000
47	73	0.052000	0.145000	0.07300	0.0000
47	113	0.043000	0.118000	0.01300	0.0000
48	107	0.025000	0.062000	0.00700	0.0000
49	51	0.031000	0.094000	0.04300	0.0000
51	52	0.037000	0.109000	0.04900	0.0000
52	55	0.027000	0.080000	0.03600	0.0000
53	54	0.025000	0.073000	0.03500	0.0000

Table E.6 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
54	55	0.035000	0.103000	0.04700	0.0000
55	57	0.065000	0.169000	0.08200	0.0000
57	58	0.046000	0.080000	0.03600	0.0000
57	63	0.159000	0.537000	0.07100	0.0000
58	59	0.009000	0.026000	0.00500	0.0000
59	61	0.002000	0.013000	0.01500	0.0000
60	62	0.009000	0.065000	0.48500	0.0000
62	64	0.016000	0.105000	0.20300	0.0000
62	144	0.001000	0.007000	0.01300	0.0000
63	526	0.026500	0.172000	0.02600	0.0000
69	211	0.051000	0.232000	0.02800	0.0000
69	79	0.051000	0.157000	0.02300	0.0000
70	71	0.032000	0.100000	0.06200	0.0000
70	528	0.020000	0.123400	0.02800	0.0000
71	72	0.036000	0.131000	0.06800	0.0000
71	73	0.034000	0.099000	0.04700	0.0000
72	77	0.018000	0.087000	0.01100	0.0000
72	531	0.025600	0.193000	0.00000	0.0000
73	76	0.021000	0.057000	0.03000	0.0000
73	79	0.018000	0.052000	0.01800	0.0000
74	88	0.004000	0.027000	0.05000	0.0000
74	562	0.028600	0.201300	0.37900	0.0000
76	77	0.016000	0.043000	0.00400	0.0000
77	78	0.001000	0.006000	0.00700	0.0000
77	80	0.014000	0.070000	0.03800	0.0000

Table E.6 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
77	552	0.089100	0.267600	0.02900	0.0000
77	609	0.078200	0.212700	0.02200	0.0000
78	79	0.006000	0.022000	0.01100	0.0000
78	84	0.000000	0.036000	0.00000	0.0000
79	211	0.099000	0.375000	0.05100	0.0000
80	211	0.022000	0.107000	0.05800	0.0000
81	194	0.003500	0.033000	0.53000	0.0000
81	195	0.003500	0.033000	0.53000	0.0000
85	86	0.008000	0.064000	0.12800	0.0000
86	87	0.012000	0.093000	0.18300	0.0000
86	323	0.006000	0.048000	0.09200	0.0000
89	91	0.047000	0.119000	0.01400	0.0000
90	92	0.032000	0.174000	0.02400	0.0000
91	94	0.100000	0.253000	0.03100	0.0000
91	97	0.022000	0.077000	0.03900	0.0000
92	103	0.019000	0.144000	0.01700	0.0000
92	105	0.017000	0.092000	0.01200	0.0000
94	97	0.278000	0.427000	0.04300	0.0000
97	100	0.022000	0.053000	0.00700	0.0000
97	102	0.038000	0.092000	0.01200	0.0000
97	103	0.048000	0.122000	0.01500	0.0000
98	100	0.024000	0.064000	0.00700	0.0000
98	102	0.034000	0.121000	0.01500	0.0000
99	107	0.053000	0.135000	0.01700	0.0000
99	108	0.002000	0.004000	0.00200	0.0000

Table E.6 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
99	109	0.045000	0.354000	0.04400	0.0000
99	110	0.050000	0.174000	0.02200	0.0000
100	102	0.016000	0.038000	0.00400	0.0000
102	104	0.043000	0.064000	0.02700	0.0000
103	105	0.019000	0.062000	0.00800	0.0000
104	108	0.076000	0.130000	0.04400	0.0000
104	322	0.044000	0.124000	0.01500	0.0000
105	107	0.012000	0.088000	0.01100	0.0000
105	110	0.157000	0.400000	0.04700	0.0000
108	324	0.074000	0.208000	0.02600	0.0000
109	110	0.070000	0.184000	0.02100	0.0000
109	113	0.100000	0.274000	0.03100	0.0000
109	114	0.109000	0.393000	0.03600	0.0000
110	112	0.142000	0.404000	0.05000	0.0000
112	114	0.017000	0.042000	0.00600	0.0000
115	122	0.003600	0.019900	0.00400	0.0000
116	120	0.002000	0.104900	0.00100	0.0000
117	118	0.000100	0.001800	0.01700	0.0000
118	119	0.000000	0.027100	0.00000	0.0000
118	1201	0.000000	0.616300	0.00000	0.0000
1201	120	0.000000	-0.369700	0.00000	0.0000
118	121	0.002200	0.291500	0.00000	0.0000
119	120	0.000000	0.033900	0.00000	0.0000
119	121	0.000000	0.058200	0.00000	0.0000
122	123	0.080800	0.234400	0.02900	0.0000

Table E.6 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
122	125	0.096500	0.366900	0.05400	0.0000
123	124	0.036000	0.107600	0.11700	0.0000
123	125	0.047600	0.141400	0.14900	0.0000
125	126	0.000600	0.019700	0.00000	0.0000
126	127	0.005900	0.040500	0.25000	0.0000
126	129	0.011500	0.110600	0.18500	0.0000
126	132	0.019800	0.168800	0.32100	0.0000
126	157	0.005000	0.050000	0.33000	0.0000
126	158	0.007700	0.053800	0.33500	0.0000
126	169	0.016500	0.115700	0.17100	0.0000
127	128	0.005900	0.057700	0.09500	0.0000
127	134	0.004900	0.033600	0.20800	0.0000
127	168	0.005900	0.057700	0.09500	0.0000
128	130	0.007800	0.077300	0.12600	0.0000
128	133	0.002600	0.019300	0.03000	0.0000
129	130	0.007600	0.075200	0.12200	0.0000
129	133	0.002100	0.018600	0.03000	0.0000
130	132	0.001600	0.016400	0.02600	0.0000
130	151	0.001700	0.016500	0.02600	0.0000
130	167	0.007900	0.079300	0.12700	0.0000
130	168	0.007800	0.078400	0.12500	0.0000
133	137	0.001700	0.011700	0.28900	0.0000
133	168	0.002600	0.019300	0.03000	0.0000
133	169	0.002100	0.018600	0.03000	0.0000
133	171	0.000200	0.010100	0.00000	0.0000

Table E.6 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
134	135	0.004300	0.029300	0.18000	0.0000
134	184	0.003900	0.038100	0.25800	0.0000
135	136	0.009100	0.062300	0.38500	0.0000
136	137	0.012500	0.089000	0.54000	0.0000
136	152	0.005600	0.039000	0.95300	0.0000
137	140	0.001500	0.011400	0.28400	0.0000
137	181	0.000500	0.003400	0.02100	0.0000
137	186	0.000700	0.015100	0.12600	0.0000
137	188	0.000500	0.003400	0.02100	0.0000
139	172	0.056200	0.224800	0.08100	0.0000
140	141	0.012000	0.083600	0.12300	0.0000
140	142	0.015200	0.113200	0.68400	0.0000
140	145	0.046800	0.336900	0.51900	0.0000
140	146	0.043000	0.303100	0.46300	0.0000
140	147	0.048900	0.349200	0.53800	0.0000
140	182	0.001300	0.008900	0.11900	0.0000
141	146	0.029100	0.226700	0.34200	0.0000
142	143	0.006000	0.057000	0.76700	0.0000
143	145	0.007500	0.077300	0.11900	0.0000
143	149	0.012700	0.090900	0.13500	0.0000
145	146	0.008500	0.058800	0.08700	0.0000
145	149	0.021800	0.151100	0.22300	0.0000
146	147	0.007300	0.050400	0.07400	0.0000
148	178	0.052300	0.152600	0.07400	0.0000
148	179	0.137100	0.391900	0.07600	0.0000

Table E.6 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
152	153	0.013700	0.095700	0.14100	0.0000
153	161	0.005500	0.028800	0.19000	0.0000
154	156	0.174600	0.316100	0.04000	0.0000
154	183	0.080400	0.305400	0.04500	0.0000
155	161	0.011000	0.056800	0.38800	0.0000
157	159	0.000800	0.009800	0.06900	0.0000
158	159	0.002900	0.028500	0.19000	0.0000
158	160	0.006600	0.044800	0.27700	0.0000
162	164	0.002400	0.032600	0.23600	0.0000
162	165	0.001800	0.024500	1.66200	0.0000
163	164	0.004400	0.051400	3.59700	0.0000
165	166	0.000200	0.012300	0.00000	0.0000
167	169	0.001800	0.017800	0.02900	0.0000
172	173	0.066900	0.484300	0.06300	0.0000
172	174	0.055800	0.221000	0.03100	0.0000
173	174	0.080700	0.333100	0.04900	0.0000
173	175	0.073900	0.307100	0.04300	0.0000
173	176	0.179900	0.501700	0.06900	0.0000
175	176	0.090400	0.362600	0.04800	0.0000
175	179	0.077000	0.309200	0.05400	0.0000
176	177	0.025100	0.082900	0.04700	0.0000
177	178	0.022200	0.084700	0.05000	0.0000
178	179	0.049800	0.185500	0.02900	0.0000
178	180	0.006100	0.029000	0.08400	0.0000
181	138	0.000400	0.020200	0.00000	0.0000

Table E.6 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
181	187	0.000400	0.008300	0.11500	0.0000
184	185	0.002500	0.024500	0.16400	0.0000
186	188	0.000700	0.008600	0.11500	0.0000
187	188	0.000700	0.008600	0.11500	0.0000
188	138	0.000400	0.020200	0.00000	0.0000
189	208	0.033000	0.095000	0.00000	0.0000
189	209	0.046000	0.069000	0.00000	0.0000
190	231	0.000400	0.002200	6.20000	0.0000
190	240	0.000000	0.027500	0.00000	0.0000
191	192	0.003000	0.048000	0.00000	0.0000
192	225	0.002000	0.009000	0.00000	0.0000
193	205	0.045000	0.063000	0.00000	0.0000
193	208	0.048000	0.127000	0.00000	0.0000
194	219	0.003100	0.028600	0.50000	0.0000
194	664	0.002400	0.035500	0.36000	0.0000
195	219	0.003100	0.028600	0.50000	0.0000
196	197	0.014000	0.040000	0.00400	0.0000
196	210	0.030000	0.081000	0.01000	0.0000
197	198	0.010000	0.060000	0.00900	0.0000
197	211	0.015000	0.040000	0.00600	0.0000
198	202	0.332000	0.688000	0.00000	0.0000
198	203	0.009000	0.046000	0.02500	0.0000
198	210	0.020000	0.073000	0.00800	0.0000
198	211	0.034000	0.109000	0.03200	0.0000
199	200	0.076000	0.135000	0.00900	0.0000

Table E.6 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
199	210	0.040000	0.102000	0.00500	0.0000
200	210	0.081000	0.128000	0.01400	0.0000
201	204	0.124000	0.183000	0.00000	0.0000
203	211	0.010000	0.059000	0.00800	0.0000
204	205	0.046000	0.068000	0.00000	0.0000
205	206	0.302000	0.446000	0.00000	0.0000
206	207	0.073000	0.093000	0.00000	0.0000
206	208	0.240000	0.421000	0.00000	0.0000
212	215	0.013900	0.077800	0.08600	0.0000
213	214	0.002500	0.038000	0.00000	1.0000
214	215	0.001700	0.018500	0.02000	0.0000
214	242	0.001500	0.010800	0.00200	0.0000
215	216	0.004500	0.024900	0.02600	0.0000
216	217	0.004000	0.049700	0.01800	0.0000
217	218	0.000000	0.045600	0.00000	0.0000
217	219	0.000500	0.017700	0.02000	0.0000
217	220	0.002700	0.039500	0.83200	0.0000
219	237	0.000300	0.001800	5.20000	0.0000
220	218	0.003700	0.048400	0.43000	0.0000
220	221	0.001000	0.029500	0.50300	0.0000
220	238	0.001600	0.004600	0.40200	0.0000
221	223	0.000300	0.001300	1.00000	0.0000
222	237	0.001400	0.051400	0.33000	1.0000
224	225	0.010000	0.064000	0.48000	0.0000
224	226	0.001900	0.008100	0.86000	0.0000

Table E.6 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
225	191	0.001000	0.061000	0.00000	0.0000
226	231	0.000500	0.021200	0.00000	0.0000
227	231	0.000900	0.047200	0.18600	1.0000
228	229	0.001900	0.008700	1.28000	0.0000
228	231	0.002600	0.091700	0.00000	0.0000
228	234	0.001300	0.028800	0.81000	0.0000
229	190	0.000000	0.062600	0.00000	0.0000
231	232	0.000200	0.006900	1.36400	0.0000
231	237	0.000100	0.000600	3.57000	0.0000
232	233	0.001700	0.048500	0.00000	0.0000
234	235	0.000200	0.025900	0.14400	0.0000
234	237	0.000600	0.027200	0.00000	0.0000
235	238	0.000200	0.000600	0.80000	0.0000
241	237	0.000500	0.015400	0.00000	1.0000
240	281	0.000300	0.004300	0.00900	0.0000
242	245	0.008200	0.085100	0.00000	0.0000
242	247	0.011200	0.072300	0.00000	0.0000
243	244	0.012700	0.035500	0.00000	0.0000
243	245	0.032600	0.180400	0.00000	0.0000
244	246	0.019500	0.055100	0.00000	0.0000
245	246	0.015700	0.073200	0.00000	0.0000
245	247	0.036000	0.211900	0.00000	0.0000
246	247	0.026800	0.128500	0.00000	0.0000
247	248	0.042800	0.121500	0.00000	0.0000
248	249	0.035100	0.100400	0.00000	0.0000

Table E.6 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
249	250	0.061600	0.185700	0.00000	0.0000
3	1	0.000000	0.052000	0.00000	0.9470
3	2	0.000000	0.052000	0.00000	0.9560
3	4	0.000000	0.005000	0.00000	0.9710
7	5	0.000000	0.039000	0.00000	0.9480
7	6	0.000000	0.039000	0.00000	0.9590
10	11	0.000000	0.089000	0.00000	1.0460
12	10	0.000000	0.053000	0.00000	0.9850
15	17	0.019400	0.031100	0.00000	0.9561
16	15	0.001000	0.038000	0.00000	0.9710
21	20	0.000000	0.014000	0.00000	0.9520
24	23	0.000000	0.064000	0.00000	0.9430
36	35	0.000000	0.047000	0.00000	1.0100
45	44	0.000000	0.020000	0.00000	1.0080
45	46	0.000000	0.021000	0.00000	1.0000
62	61	0.000000	0.059000	0.00000	0.9750
63	64	0.000000	0.038000	0.00000	1.0170
73	74	0.000000	0.024400	0.00000	1.0000
81	88	0.000000	0.020000	0.00000	1.0000
85	99	0.000000	0.048000	0.00000	1.0000
86	102	0.000000	0.048000	0.00000	1.0000
87	94	0.000000	0.046000	0.00000	1.0150
114	207	0.000000	0.149000	0.00000	0.9670
116	124	0.005200	0.017400	0.00000	1.0100
121	115	0.000000	0.028000	0.00000	1.0500

Table E.6 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
122	157	0.000500	0.019500	0.00000	1.0000
130	131	0.000000	0.018000	0.00000	1.0522
130	150	0.000000	0.014000	0.00000	1.0522
132	170	0.001000	0.040200	0.00000	1.0500
141	174	0.002400	0.060300	0.00000	0.9750
142	175	0.002400	0.049800	-0.08700	1.0000
143	144	0.000000	0.083300	0.00000	1.0350
143	148	0.001300	0.037100	0.00000	0.9565
145	180	0.000500	0.018200	0.00000	1.0000
151	170	0.001000	0.039200	0.00000	1.0500
153	183	0.002700	0.063900	0.00000	1.0730
155	156	0.000800	0.025600	0.00000	1.0500
159	117	0.000000	0.016000	0.00000	1.0506
160	124	0.001200	0.039600	0.00000	0.9750
163	137	0.001300	0.038400	-0.05700	0.9800
164	155	0.000900	0.023100	-0.03300	0.9560
182	139	0.000300	0.013100	0.00000	1.0500
189	210	0.000000	0.252000	0.00000	1.0300
193	196	0.000000	0.237000	0.00000	1.0300
195	212	0.000800	0.036600	0.00000	0.9850
200	248	0.000000	0.220000	0.00000	1.0000
201	69	0.000000	0.098000	0.00000	1.0300
202	211	0.000000	0.128000	0.00000	1.0100
204	2040	0.020000	0.204000	-0.01200	1.0500
209	198	0.026000	0.211000	0.00000	1.0300

Table E.6 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
211	212	0.003000	0.012200	0.00000	1.0000
218	219	0.001000	0.035400	-0.01000	0.9700
223	224	0.001200	0.019500	-0.36400	1.0000
229	230	0.001000	0.033200	0.00000	1.0200
234	236	0.000500	0.016000	0.00000	1.0700
238	239	0.000500	0.016000	0.00000	1.0200
196	2040	0.000100	0.020000	0.00000	1.0000
119	1190	0.001000	0.023000	0.00000	1.0223
120	1200	0.000000	0.023000	0.00000	0.9284
7002	2	0.001000	0.014600	0.00000	1.0000
7003	3	0.000000	0.010540	0.00000	1.0000
7061	61	0.000000	0.023800	0.00000	1.0000
7062	62	0.000000	0.032140	0.00000	0.9500
7166	166	0.000000	0.015400	0.00000	1.0000
7024	24	0.000000	0.028900	0.00000	1.0000
7001	1	0.000000	0.019530	0.00000	1.0000
7130	130	0.000000	0.019300	0.00000	1.0000
7011	11	0.000000	0.019230	0.00000	1.0000
7023	23	0.000000	0.023000	0.00000	1.0000
7049	49	0.000000	0.012400	0.00000	1.0000
7139	139	0.000000	0.016700	0.00000	1.0000
7012	12	0.000000	0.031200	0.00000	1.0000
7017	17	0.000000	0.016540	0.00000	0.9420
7039	39	0.000000	0.031590	0.00000	0.9650
7057	57	0.000000	0.053470	0.00000	0.9500

Table E.6 continued from previous page

From BUS	To BUS	Resistance (R) (p.u)	Reactance (X) (p.u)	Line Char- ging (1/2B) (p.u)	Transformer Tap Ratio (p.u)
7044	44	0.000000	0.181810	0.00000	0.9420
7055	55	0.000000	0.196070	0.00000	0.9420
7071	71	0.000000	0.068960	0.00000	0.9565

Рис.1. IEEE тестовая схема, состоящая из 300 узлов

Tabela E.3: Table E1 continued from previous page

Bus Number	Bus Code	Voltage magnitude (p.u)	Voltage angle (degree)	P-Load (MW)	Q-Load (Mvar)	P-Gen (MW)	Q-Gen (Mvar)	Q_min (Mvar)	Q_max (Mvar)	Shunt Capacitance (Mvar)	V-min (p.u)	V-max (p.u)
131	2	1.0535	9.24	17.00	9.00	372.00	0.00	-50.00	175.00	0	0	0
132	2	1.0435	10.46	0.00	0.00	216.00	0.00	-50.00	90.00	0	0	0
133	0	0.9663	-1.80	70.00	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
134	0	1.0177	6.75	200.00	50.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
135	2	0.9630	5.15	75.00	50.00	0.00	0.00	-10.00	15.00	0	0	0
136	0	0.9845	-11.93	123.50	-24.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
137	0	0.9987	-11.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
138	0	0.9867	-9.82	33.00	16.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
139	0	0.9998	-12.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
140	0	1.0360	8.85	35.00	15.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
141	0	0.9918	18.50	85.00	24.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
142	0	1.0410	2.91	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
143	0	0.9839	9.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
144	0	1.0002	26.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
145	0	0.9973	30.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
146	0	0.9715	-6.91	299.90	95.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
147	0	1.0024	-4.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
148	0	0.9879	-6.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
149	2	0.9290	0.09	481.80	205.00	205.00	0.00	-40.00	90.00	0	0	0
150	2	0.9829	-9.94	763.60	291.10	0.00	0.00	-50.00	150.00	0	0	0
151	0	1.0244	-6.22	26.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
152	0	0.9837	-12.75	163.50	43.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
153	0	1.0622	-2.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
154	0	0.9730	-7.21	176.00	83.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
155	2	1.0522	4.67	5.00	4.00	228.00	0.00	-45.00	90.00	0	0	0
156	2	1.0077	0.62	28.00	12.00	84.00	0.00	-15.00	35.00	0	0	0
157	0	0.9397	-6.56	427.40	173.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
158	0	0.9699	-9.37	74.00	29.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
159	0	0.9793	-3.09	69.50	49.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
160	0	1.0518	-1.33	73.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
161	0	1.0447	-4.19	240.70	89.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
162	0	0.9717	7.12	40.00	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
163	0	1.0386	-6.85	136.80	16.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
164	2	1.0522	-4.33	0.00	0.00	200.00	0.00	-50.00	80.00	0	0	0
165	2	1.0650	2.17	59.80	24.30	1200.00	0.00	-100.00	400.00	0	0	0
166	2	1.0650	1.40	59.80	24.30	1200.00	0.00	-100.00	400.00	0	0	0
167	0	1.0533	-0.72	182.60	43.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
168	0	0.9975	-25.84	7.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
169	2	1.0551	-20.62	0.00	0.00	475.00	0.00	-300.00	300.00	0	0	0
170	2	1.0435	12.25	489.00	53.00	1973.00	0.00	-1000.00	1000.00	0	0	0
171	0	0.9374	-11.18	800.00	72.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
172	0	0.9897	-26.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
173	0	1.0489	-19.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
174	0	1.0357	-20.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
175	0	0.9695	-25.32	10.00	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
176	0	0.9907	-23.72	43.00	14.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
177	2	1.0150	-20.58	64.00	21.00	424.00	0.00	-260.00	260.00	0	0	0
178	0	0.9528	-26.05	35.00	12.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
179	0	0.9550	-25.93	27.00	12.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
180	0	0.9692	-27.49	41.00	14.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
181	0	0.9908	-25.33	38.00	13.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
182	0	1.0033	-22.35	42.00	14.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
183	0	0.9718	-25.70	72.00	24.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
184	0	0.9838	-26.07	0.00	-5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
185	0	0.9992	-27.41	12.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
186	0	1.0137	-27.44	-21.00	-14.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
187	0	0.9929	-26.28	7.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
188	0	0.9999	-25.66	38.00	13.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
189	0	0.9788	-24.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
190	0	1.0017	-23.31	96.00	7.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
191	0	1.0132	-22.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
192	2	1.0100	-11.67	0.00	0.00	272.00	0.00	-150.00	150.00	0	0	0
193	0	0.9919	-17.53	22.00	16.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
194	0	0.9866	-20.23	47.00	26.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
195	0	0.9751	-22.53	176.00	105.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0

Tabela E.4: Table E1 continued from previous page

Bus Number	Bus Code	Voltage magnitude (p.u)	Voltage angle (degree)	P-Load (MW)	Q-Load (Mvar)	P-Gen (MW)	Q-Gen (Mvar)	Q_min (Mvar)	Q_max (Mvar)	Shunt Capacitance (Mvar)	V-min (p.u)	V-max (p.u)
196	0	1.0215	-22.20	100.00	75.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
197	0	1.0075	-22.63	131.00	96.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
198	0	1.0554	-21.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
199	2	1.0080	-21.73	285.00	100.00	100.00	0.00	-60.00	60.00	0	0	0
200	2	1.0000	-22.49	171.00	70.00	450.00	0.00	-320.00	320.00	0	0	0
201	2	1.0500	-23.17	328.00	188.00	250.00	0.00	-300.00	300.00	0	0	0
202	0	0.9965	-22.70	428.00	232.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
203	0	1.0002	-21.55	173.00	99.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
204	0	0.9453	-11.34	410.00	40.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
205	0	1.0180	-21.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
206	2	1.0000	-27.22	538.00	369.00	303.00	0.00	-300.00	300.00	0	0	0
207	0	1.0423	-20.94	223.00	148.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
208	0	1.0496	-19.94	96.00	46.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
209	2	1.0400	-13.82	0.00	0.00	345.00	0.00	-250.00	250.00	0	0	0
210	0	1.0535	-21.22	159.00	107.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
211	0	1.0414	-23.19	448.00	143.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
212	2	1.0000	-25.90	404.00	212.00	300.00	0.00	-500.00	500.00	0	0	0
213	0	1.0387	-20.89	572.00	244.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
214	0	1.0095	-21.03	269.00	157.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
215	2	1.0165	-15.40	0.00	0.00	600.00	0.00	-300.00	300.00	0	0	0
216	0	1.0558	-21.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
217	2	1.0100	-20.94	255.00	149.00	250.00	0.00	-200.00	200.00	0	0	0
218	2	1.0000	-15.86	0.00	0.00	550.00	0.00	-400.00	400.00	0	0	0
219	0	1.0237	-20.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
220	2	1.0500	-16.50	0.00	0.00	575.43	0.00	-600.00	600.00	0	0	0
221	2	0.9930	-17.53	0.00	0.00	170.00	0.00	40.00	100.00	0	0	0
222	2	1.0100	-19.27	8.00	3.00	84.00	0.00	40.00	80.00	0	0	0
223	0	0.9921	-20.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
224	0	0.9711	-20.90	61.00	30.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
225	0	0.9651	-21.74	77.00	33.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
226	0	0.9688	-21.67	61.00	30.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
227	0	0.9760	-25.23	29.00	14.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
228	0	0.9752	-25.65	29.00	14.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
229	0	1.0196	-23.80	-23.00	-17.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
230	0	1.0251	-20.06	-33.10	-29.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
231	0	1.0152	1.48	115.80	-24.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
232	0	1.0146	-2.23	2.40	-12.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
233	0	1.0005	-17.61	2.40	-3.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
234	0	0.9810	-13.69	-14.90	26.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
235	0	0.9750	-23.42	24.70	-1.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
236	0	0.9429	-34.31	145.30	-34.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
237	0	0.9723	-37.58	28.10	-20.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
238	0	0.9604	-29.10	14.00	2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
239	0	1.0009	-23.36	-11.10	-1.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
240	0	0.9777	-28.00	50.50	17.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
241	0	0.9583	-28.79	29.60	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
242	0	1.0309	-17.00	-113.70	76.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
243	0	1.0128	3.90	100.31	29.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
244	0	1.0244	-7.52	-100.00	34.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
245	0	1.0122	-15.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
246	0	0.9653	-14.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
247	2	1.0507	10.79	0.00	0.00	467.00	0.00	-210.00	210.00	0	0	0
248	2	1.0507	12.48	0.00	0.00	623.00	0.00	-280.00	280.00	0	0	0
249	2	1.0323	13.76	0.00	0.00	1210.00	0.00	-420.00	420.00	0	0	0
250	2	1.0145	4.99	0.00	0.00	234.00	0.00	-100.00	100.00	0	0	0
251	2	1.0507	11.57	0.00	0.00	372.00	0.00	-224.00	224.00	0	0	0
252	2	1.0507	-10.47	0.00	0.00	330.00	0.00	0.00	350.00	0	0	0
253	2	1.0507	6.15	0.00	0.00	185.00	0.00	0.00	120.00	0	0	0
254	2	1.0290	12.60	0.00	0.00	410.00	0.00	-224.00	224.00	0	0	0
255	2	1.0500	2.11	0.00	0.00	500.00	0.00	-200.00	200.00	0	0	0
256	2	1.0145	-13.92	0.00	0.00	37.00	0.00	0.00	42.00	0	0	0
257	3	1.0507	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
258	2	0.9967	-7.50	0.00	0.00	45.00	0.00	0.00	25.00	0	0	0
259	2	1.0212	-3.44	0.00	0.00	165.00	0.00	-90.00	90.00	0	0	0
260	2	1.0145	1.97	0.00	0.00	400.00	0.00	-150.00	150.00	0	0	0

Tabela E.5: Table E1 continued from previous page

Bus Number	Bus Code	Voltage magnitude (p.u)	Voltage angle (degree)	P-Load (MW)	Q-Load (Mvar)	P-Gen (MW)	Q-Gen (Mvar)	Q_min (Mvar)	Q_max (Mvar)	Shunt Capacitance (Mvar)	V-min (p.u)	V-max (p.u)
261	2	1.0017	5.80	0.00	0.00	400.00	0.00	0.00	150.00	0	0	0
262	2	0.9893	-25.35	0.00	0.00	116.00	0.00	0.00	87.00	0	0	0
263	2	1.0507	19.02	0.00	0.00	1292.00	0.00	-100.00	600.00	0	0	0
264	2	1.0507	2.75	0.00	0.00	700.00	0.00	-125.00	325.00	0	0	0
265	2	1.0145	35.05	0.00	0.00	553.00	0.00	-200.00	300.00	0	0	0
266	0	1.0117	-11.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
267	2	0.9945	-18.86	0.00	0.00	-4.20	0.00	-2.00	2.00	0	0	0
268	0	0.9833	-19.68	2.71	0.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
269	0	0.9768	-19.82	0.86	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
270	0	1.0117	-11.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
271	0	1.0029	-17.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
272	0	0.9913	-18.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
273	0	1.0023	-17.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
274	0	0.9887	-19.09	4.75	1.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
275	0	0.9648	-21.67	1.53	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
276	0	0.9747	-19.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
277	0	0.9706	-21.43	1.35	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
278	0	0.9649	-20.48	0.45	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
279	0	0.9657	-20.39	0.45	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
280	0	0.9318	-25.03	1.84	0.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
281	0	0.9441	-23.84	1.39	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
282	0	0.9286	-25.33	1.89	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
283	0	0.9973	-21.10	1.55	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
284	0	0.9506	-23.19	1.66	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
285	0	0.9598	-22.67	3.03	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
286	0	0.9570	-22.58	1.86	0.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
287	0	0.9391	-24.41	2.58	0.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
288	0	0.9636	-21.33	1.01	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
289	0	0.9501	-22.50	0.81	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
290	0	0.9646	-21.42	1.60	0.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
291	0	0.9790	-19.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
292	2	1.0000	-19.40	0.00	0.00	-35.81	0.00	-17.35	17.35	0	0	0
293	0	0.9786	-17.25	30.00	23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
294	2	1.0000	-17.68	0.00	0.00	-26.48	0.00	-12.80	12.83	0	0	0
295	2	1.0000	-6.83	0.00	0.00	50.00	0.00	-38.00	38.00	0	0	0
296	2	1.0000	-7.54	0.00	0.00	8.00	0.00	-6.00	6.00	0	0	0
297	0	0.9752	-20.48	1.02	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
298	0	0.9803	-19.92	1.02	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
299	0	0.9799	-19.30	3.80	1.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0
300	0	1.0402	-18.24	1.19	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0

REFERÊNCIAS

K KIRAN KUMAR, N VENKATA RAMANA, S Kamakshaiah, and PM Nishanth. State of art for network reconfiguration methodologies of distribution system. *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 57(1), 2013.

Thomas H Cormen. *Introduction to algorithms*. MIT press, 2009.

Carlos Bernardes Rosa Junior. Um método de fluxo de carga não iterativo como ferramenta para estudos de colapso de tensão.

David E Goldberg and John H Holland. Genetic algorithms and machine learning. *Machine learning*, 3(2):95–99, 1988.

Aurora Pozo, A de F Cavalheiro, Celso Ishida, Eduardo Spinosa, and Ernesto Malta Rodrigues. Computação evolutiva. *Universidade Federal do Paraná, 61p.(Grupo de Pesquisas em Computação Evolutiva, Departamento de Informática-Universidade Federal do Paraná*, 2005.

Fangxing Li, Wei Qiao, Hongbin Sun, Hui Wan, Jianhui Wang, Yan Xia, Zhao Xu, and Pei Zhang. Smart transmission grid: Vision and framework. *IEEE transactions on Smart Grid*, 1(2):168–177, 2010.

Yona Lopes, Joberto S. B. Martins, Ricardo Henrique Frazão Franco, David Acosta Molano, Margareth Apostolo dos Santos, Flavio Galvão Calhau, Carlos Alberto Malcher Bastos, and Natalia Castro Fernandes. Smart Grid e IEC 61850: Novos Desafios em Redes e Telecomunicações para o Sistema Elétrico. In *XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrT'12*, pages 1–44. SBRT - Sociedade Brasileira de Telecomunicações, Brasilia, Brazil, September 2012.

Romildo Martins da Silva Bezerra, Flávio G. Calhau, Flavia M. S. Nascimento, and Joberto Sérgio Barbosa Martins. A Framework to Support Smart Grid Solutions with Ubiquitous , Autonomic and Real-Time Features Targeting the Sustainable Use of Renewable Power. *Journal of Selected Areas in Renewable Energy*, 3(10):1–6, October 2013.

Carlos A. M. Bastos, Joberto Sérgio Barbosa Martins, José Augusto Suruagy Monteiro, Anilton Salles Garcia, Ana Elisa Ferreira, João Marcos da Silva, and Walter da Costa Pinto Neto. Proteção e Supervisão de Sistemas Elétricos numa Estratégia Smart Grid com Redes IP de Nova Geração - POWER SYSTEMS PROTECTION AND SUPERVISION IN A SMART GRID STRATEGY USING NEW GENERATION IP NETWORKS. *Revista de Sistemas e Computação - RSC*, 1(1):81–103, 2011.

Eonassis O. Santos and Joberto S. B. Martins. Distribution Power Network Reconfiguration in the Smart Grid. In *Proceedings of the International Seminar on Politics, Incentives, Technology and Regulation of Smart Grids*, pages 1–13, Rio de Janeiro, Brazil, December 2017. CIGRÉ-BRASIL - Brazilian National Committee.

Ezequiel Campos Pereira. *Reconfiguração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica para Minimização de Perdas Técnicas*. PhD thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

Christopher A Chung. *Simulation modeling handbook: a practical approach*. CRC press, 2003.

RW Uluski. Using distribution automation for a self-healing grid. In *Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES*, pages 1–5. IEEE, 2012.

Nikhil Gupta, Anil Swarnkar, and KR Niazi. Distribution network reconfiguration for power quality and reliability improvement using genetic algorithms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 54:664–671, 2014.

Flávio Calhau, Alysson Pezzutti, and Joberto Martins. On evaluating power loss with hatsga algorithm for power network reconfiguration in the smart grid. *5th International Workshop on ADVANCES in ICT Infrastructure and Services, At Paris Saclay University*, pages 1–7, 01 2017.

Ching-Tzong Su, Chung-Fu Chang, and Ji-Pyng Chiou. Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm. *Electric Power Systems Research*, 75(2-3):190–199, 2005.

Flávio G. Calhau, Alysson Pezzutti, Romildo M da Silva Bezerra, and Joberto S. B. Martins. Hybrid Algorithm based on Genetic Algorithm and Tabu Search for the Reconfiguration Problem in Smart Grid Networks using “R”. In *Proceedings of the IV International Workshop on ADVANCES in ICT Infrastructures and Services*, pages 1–10, Recife, December 2015.

Soteris Kalogirou, Kostas Metaxiotis, and Adel Mellit. Artificial intelligence techniques for modern energy applications. *IGI Global*, pages 1–39, 2010.

- Sarvapali D Ramchurn, Perukrishnen Vytelingum, Alex Rogers, and Nicholas R Jennings. Putting the 'smarts' into the smart grid: a grand challenge for artificial intelligence. *Communications of the ACM*, 55(4):86–97, 2012.
- Flávio Calhau, Romildo Martins Bezerra, and Joberto S. B. Martins. The R Approach for Modeling a Reconfiguration Problem in Smart Grid Networks. In *Proceedings of the 3rd International Workshop on ICT Infrastructures and Services*, pages 1–7, Miami, October 2014.
- A. Merlin and H. Back. Search for a Minimal-Loss Operating Spanning Tree Configuration in an Urban Power Distribution System. In *Proc. 5th Power System Computation Conference (PSCC)*, Cambridge, U.K., September 1975.
- Seyhan Civanlar, JJ Grainger, Ho Yin, and SSH Lee. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(3):1217–1223, 1988.
- Mesut E Baran and Felix F Wu. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power delivery*, 4(2):1401–1407, 1989.
- Dariusz Shirmohammadi and H Wayne Hong. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(2):1492–1498, 1989.
- Edgar Manuel Carreno, Ruben Romero, and Antonio Padilha-Feltrin. An efficient codification to solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(4):1542–1551, 2008.
- Koichi Nara, Atsushi Shiose, Minoru Kitagawa, and Toshihisa Ishihara. Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum re-configuration. *IEEE Transactions on Power systems*, 7(3):1044–1051, 1992.
- R Cherkaoui, A Bart, and AJ Germond. Optimal configuration of electrical distribution networks using heuristic methods. In *Proceedings of the 11th Power Systems Computation Conference*, volume 1, pages 147–154, 1993.
- Vinicius Jacques Garcia and Paulo Morelato França. Multiobjective tabu search for service restoration in electric distribution networks. In *Power Tech, 2005 IEEE Russia*, pages 1–7. IEEE, 2005.
- T Thakur et al. Application of tabu-search algorithm for network reconfiguration in radial distribution system. In *Power Electronics, Drives and Energy Systems, 2006. PEDES'06. International Conference on*, pages 1–4. IEEE, 2006.

Rachid Cherkaoui, A Bart, and A J. Germond. Optimal configuration of electrical distribution networks using heuristic methods. 1, 01 1993.

Enrico Carpaneto and Gianfranco Chicco. Ant-colony search-based minimum losses reconfiguration of distribution systems. In *Electrotechnical Conference, 2004. MELECON 2004. Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean*, volume 3, pages 971–974. IEEE, 2004.

Ashish Ahuja, Sanjoy Das, and Anil Pahwa. An ais-aco hybrid approach for multi-objective distribution system reconfiguration. *IEEE transactions on power systems*, 22(3):1101–1111, 2007.

Yuhui Shi et al. Particle swarm optimization: developments, applications and resources. In *evolutionary computation, 2001. Proceedings of the 2001 Congress on*, volume 1, pages 81–86. IEEE, 2001.

Carlos A Coello Coello, Gary B Lamont, David A Van Veldhuizen, et al. *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*, volume 5. Springer, 2007.

MR Irving, WP Luan, and JS Daniel. Supply restoration in distribution networks using a genetic algorithm. *International journal of electrical power & energy systems*, 24(6):447–457, 2002.

Y-T Hsiao and C-Y Chien. Enhancement of restoration service in distribution systems using a combination fuzzy-ga method. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(4):1394–1400, 2000.

Dong-Joon Shin, Jin-O Kim, Tae-Kyun Kim, Jin-Boo Choo, and C Singh. Optimal service restoration and reconfiguration of network using genetic-tabu algorithm. *Electric Power Systems Research*, 71(2):145–152, 2004.

Romeu M Vitorino, LP Neves, and HM Jorge. Network reconfiguration to improve reliability and efficiency in distribution systems. In *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest*, pages 1–7. IEEE, 2009.

Muhammad Sarwar and Bilal Asad. A review on future power systems; technologies and research for smart grids. In *Emerging Technologies (ICET), 2016 International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2016.

Robert Clay Prim. Shortest connection networks and some generalizations. *Bell Labs Technical Journal*, 36(6):1389–1401, 1957.

J Duncan Glover, Mulukutla S Sarma, and Thomas Overbye. *Power System Analysis & Design, SI Version*. Cengage Learning, 2012.

- MS Srinivas. Distribution load flows: a brief review. In *Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE*, volume 2, pages 942–945. IEEE, 2000.
- Carol S Cheng and Dariush Shirmohammadi. A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(2):671–679, 1995.
- Luis Fernando Ochoa Pizzali. Cálculo de fluxo de potência em redes de distribuição com modelagem a quatro fios. *UNESP. Ilha solteira*, 2003.
- Juan Pedro Milaszewicz. Improving jacobi and gauss-seidel iterations. *Linear Algebra and Its Applications*, 93:161–170, 1987.
- Michael D Hendy and David Penny. Branch and bound algorithms to determine minimal evolutionary trees. *Mathematical Biosciences*, 59(2):277–290, 1982.
- Jens Clausen. Branch and bound algorithms-principles and examples. *Department of Computer Science, University of Copenhagen*, pages 1–30, 1999.
- Rayapudi Srinivasa Rao, Sadhu Venkata Lakshmi Narasimham, Manyala Ramalinga Raju, and A Srinivasa Rao. Optimal network reconfiguration of large-scale distribution system using harmony search algorithm. *IEEE Transactions on power systems*, 26(3):1080–1088, 2011.
- Chen-Ching Liu, Seung J Lee, and Khoi Vu. Loss minimization of distribution feeders: optimality and algorithms. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(2):1281–1289, 1989.
- V Glamocanin. Optimal loss reduction of distributed networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(3):774–782, 1990.
- Charles T Huddleston, Robert P Broadwater, and A Chandrasekaran. Reconfiguration algorithm for minimizing losses in radial electric distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 18(1):57–66, 1990.
- Fred Glover. Tabu search—part i. *ORSA Journal on computing*, 1(3):190–206, 1989.
- Marcos Antonio do Nascimento Guimarães et al. Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmos de busca tabu. 2005.
- André Gomes. Uma introdução à busca tabu. *Departamento de Ciência da Computação, Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo*, 2009.
- Marcel P. Caraciolo. Computação evolucionária: Algoritmos genéticos, 2009.

L.J. Fogel, A.J. Owens, and M.J. Walsh. *Artificial Intelligence Through Simulated Evolution*. John Wiley & Sons, 1966.

I. Rechenberg. *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Frommann-Holzboog, 1973.

Hans-Paul Schwefel. *Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels der Evolutionsstrategie*. Birkhauser, 1974.

John Henry Holland. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press, 1992.

John Daniel Bagley. The behavior of adaptive systems which employ genetic and correlation algorithms: technical report. 1967.

RJ Mitchell, B Chambers, and AP Anderson. Array pattern control in the complex plane optimised by a genetic algorithm. In *Antennas and Propagation, Tenth International Conference on (Conf. Publ. No. 436)*, volume 1, pages 330–333. IET, 1997.

Gustavo Luís Soares. Algoritmos genéticos: Estudo, novas técnicas e aplicações. *Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais*, page 40, 1997.

Kalyanmoy Deb, Samir Agrawal, Amrit Pratap, and Tanaka Meyarivan. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: Nsga-ii. In *International Conference on Parallel Problem Solving From Nature*, pages 849–858. Springer, 2000.

R Development Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2008. ISBN 3-900051-07-0.

Power systems test case archive - uwee.
<https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/>, 2018. "acessado em 07/02/2018".

Ray Daniel Zimmerman, Carlos Edmundo Murillo-Sanchez, and Robert John Thomas. Matpower: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education. *IEEE Transactions on power systems*, 26(1):12–19, 2011.