

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

CARINE FLÁVIA DOS REIS

**ESTUDOS SOBRE A CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM DE
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE
POTÊNCIA UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO**

FORMIGA – MG

2019

CARINE FLÁVIA DOS REIS

**ESTUDOS SOBRE A CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM DE
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE
POTÊNCIA UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de
Minas Gerais, como requisito para obtenção do título
de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Renan Souza Moura

Coorientador: Prof. Dr. Ulysses Rondina Duarte

FORMIGA – MG

2019

Reis, Carine Flávia dos.
621.3 Estudos sobre a capacidade de hospedagem de geração distribuída em
Sistemas elétricos de Potência utilizando algoritmo genético /
Carine Flávia dos Reis -- Formiga : IFMG, 2019.
106p.. : il.

Orientador: Prof. Dr. Renan Souza Moura
Co-Orientador: Prof. Dr. Ulysses Rondina Duarte
Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Formiga.

1. Geração Distribuída. 2. Capacidade de Hospedagem. 3.
Algoritmo Genético. 4. Margem de Carregamento. 5. Curva PV. I. Título.

CDD 621.3

CARINE FLÁVIA DOS REIS

**ESTUDOS SOBRE A CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM DE
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE
POTÊNCIA UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto
Federal de Minas Gerais como requisito para
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Elétrica.

Avaliado em: ____ de _____ de _____.

Nota: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Renan Souza Moura
Orientador

Prof. Dr. Carlos Renato Borges dos Santos
(Membro da Banca Examinadora)

Msc. Felipe de Sousa Silva
(Membro da Banca Examinadora)

RESUMO

O emprego de geração distribuída tem crescido gradualmente e se mostrado uma nova tendência a ser seguida pelo setor elétrico. Este tipo de geração apresenta inúmeras vantagens em relação ao fornecimento de energia elétrica pelas grandes usinas como menores perdas de transporte de energia, danos ambientais mínimos durante a instalação, rápida instalação, menor capital investido, entre outras. No entanto, a inserção descontrolada de geração distribuída no sistema elétrico pode acarretar problemas que afetam diretamente a operação e o planejamento da rede. Neste contexto, este trabalho tem por objetivo estimar, por meio de simulações em MATLABR2014a, a capacidade de hospedagem de geração distribuída que pode ser inserida em um sistema elétrico de potência de forma a ampliar a carga máxima a ser abastecida. O valor de capacidade de hospedagem de cada sistema é obtido através da técnica do algoritmo genético considerando como função objetivo a curva PV. A metodologia proposta é empregada em dois sistemas teste do IEEE e um sistema real brasileiro. Por meio dos resultados, nota-se que o algoritmo genético conseguiu ampliar o valor da máxima carga que pode ser abastecida pelos sistemas elétricos testados. Dentre os sistemas analisados, o sistema de 14 barramentos foi o que mais se destacou, obtendo um aumento significativo de 73,78% na sua margem de carregamento, seguido do sistema de 30 barramentos e Sul Sudeste com 7,36 e 6,76%, respectivamente. Em consequência dos resultados obtidos, constata-se que ao obter a capacidade de hospedagem suportada e otimizá-la, é possível postergar o ponto de colapso de tensão da rede.

Palavras chave: Geração Distribuída, Capacidade de Hospedagem, Algoritmo Genético, Margem de Carregamento, Curva PV.

ABSTRACT

The employment of distributed generation has grown gradually and has shown a new tendency to be followed by the electric sector. This type of generation has many advantages in relation to the supply of electric energy by large plants such as lower energy transport losses, minimal environmental damage during installation, quick installation, less invested capital, among others. However, the uncontrolled insertion of distributed generation into the electrical system can lead to problems that directly affect the operation and planning of the network. In this context, this work aims to estimate, through simulations in MATLABR2014a, the capacity of distributed generation hosting that can be inserted in an electric power system in order to increase the maximum load to be supplied. The value of the hosting capacity of each system is obtained through the technique of the genetic algorithm considering as objective function the PV curve. The proposed methodology is used in two IEEE test systems and a Brazilian real system. By means of the results, it is noticed that the genetic algorithm was able to increase the value of the maximum load that can be supplied by the electrical systems tested. Among the analyzed systems, the system of 14 buses was the one that stood out the most, obtaining a significant increase of 73,78% in its load margin, followed by the system of 30 buses and Sul Sudeste with 7,36 and 6,76%, respectively. As a result of the results obtained, it is verified that in obtaining the supported hosting capacity and optimizing it, it is possible to post the collapse point of the network voltage.

Keywords: Distributed Generation, Hosting Capacity, Genetic Algorithm, Load Margin, PV Curve.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Setores que compõem o sistema elétrico de potência.	17
Figura 2: Matriz energética brasileira.	31
Figura 3: Geradores instalados por fonte de energia.	32
Figura 4: Mapa da irradiação solar no Brasil.	32
Figura 5: Evolução dos preços da energia solar fotovoltaica.	33
Figura 6: Quantidade de Usina de geração distribuída no Brasil.	34
Figura 7: Gráfico de projeção de microgeradores instalados entre 2017 e 2024.	35
Figura 8: Fluxograma para elaboração de um fluxo de potência convencional.	40
Figura 9: Sistema de dois barramentos.	42
Figura 10: Traçados de curvas PV para diferentes fatores de potência diferente.	48
Figura 11: Margem de carga em uma curva PV genérica.	49
Figura 12: Fluxograma de um algoritmo genético básico.	52
Figura 13: Processo simplificado de um algoritmo genético.	53
Figura 14: Fluxograma da metodologia proposta.	61
Figura 15: Curva PV para o sistema de 14 barramentos.	73
Figura 16: Curva PV para o sistema de 30 barramentos.	74
Figura 17: Curva PV para o sistema Sul Sudeste (65 barramentos).	74
Figura 18: Probabilidade de seleção por meio da roleta viciada.	78
Figura 19: Demonstração do processo de cruzamento do algoritmo genético genérico implementado.	79
Figura 20: Margem de carregamento para o sistema de 14 barramentos: (a) Antes da utilização do algoritmo genético; (b) Após a utilização do algoritmo genético.	83
Figura 21: Margem de carregamento para o sistema de 30 barramentos: (a) Antes da utilização do algoritmo genético; (b) Após a utilização do algoritmo genético.	84
Figura 22: Margem de carregamento para o sistema Sul Sudeste: (a) Antes da utilização do algoritmo genético; (b) Após a utilização do algoritmo genético.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de tensão simulados por meio do cálculo do fluxo de potência para o sistema de 14 barramentos do IEEE.	67
Tabela 2: Valores de potência (injetada e gerada) simulados por meio do cálculo do fluxo de potência para o sistema de 14 barramentos do IEEE.....	67
Tabela 3: Valores de tensão simulados por meio do cálculo do fluxo de potência para o sistema de 30 barramentos do IEEE.	68
Tabela 4: Valores de potência (injetada e gerada) simulados por meio do cálculo do fluxo de potência para o sistema de 30 barramentos do IEEE.....	69
Tabela 5: Valores de tensão simulados por meio do cálculo do fluxo de potência para o sistema de barramento sul sudeste.....	70
Tabela 6: Valores de potência (injetada e gerada) simulados por meio do cálculo do fluxo de potência para o sistema sul sudeste.	71
Tabela 7: Margem de carregamento para os sistemas teste analisados.	75
Tabela 8: Comparativo das margens de carregamento simuladas e apresentadas por MOURA, 2016 e LEAL, 2017.	75
Tabela 9: Cromossomos utilizados para a população inicial.....	77
Tabela 10: Resultados obtidos para a simulação com valores de X e Y pré-determinados.	80
Tabela 11: Resultados obtidos para a simulação com valores de X e Y aleatórios.....	81
Tabela 12: Comparativo entre a simulação do algoritmo genético genérico e os resultados obtidos por LINDEN, 2012.	82
Tabela 13: Barramentos críticos dos sistemas analisados.	83
Tabela 14: Comparativo entre as margens de carregamento com e sem a otimização do algoritmo genético e percentual de aumento.	84
Tabela 15: Relação de potências ativas e reativas geradas antes e após a otimização para o sistema de 14 barramentos.....	85
Tabela 16: Relação de potências ativas e reativas geradas antes e após a otimização para o sistema de 30 barramentos.....	86
Tabela 17:Relação de potências ativas e reativas geradas antes e após a otimização para o sistema Sul Sudeste.	86

LISTA DE SIGLAS

ABGD	Associação Brasileira de Geração Distribuída
AG	Algoritmo Genético
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APF	<i>Active Power Filters</i>
AVR	<i>Automatic Voltage Regulators</i>
BPFC	<i>Bi-directional Power Flow Controller</i>
CFS	<i>Chaotic Free Search</i>
FACTS	<i>Flexible AC Transmission Systems</i>
F-MTPFC	<i>Floating Multi-Terminal Power Flow Controller</i>
FVSI	<i>Fast Voltage Stability Index</i>
GD	Geração Distribuída
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MC	Margem de Carregamento
MOPSO	<i>Multiple Objective Particle Swarm Optimization</i>
MTPFC	<i>Multipoint Power Flow Controller</i>
MTP	Máxima Transferência de Potência
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OPF	<i>Optimal Power Flow</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
SMIB	<i>Single Machine Infinite Bus</i>
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator</i>
SVC	<i>Static Var Compensator</i>
UPFC	<i>Unified Power Flow Controller</i>
VSPS	<i>Variable Speed Pumped Storage</i>

Sumário

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	12
1.1 INTRODUÇÃO	12
1.2 MOTIVAÇÃO	14
1.3 OBJETIVO PRINCIPAL	15
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 INTRODUÇÃO AO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	17
2.2 FLUXO DE POTÊNCIA.....	20
2.3 ESTABILIDADE DE TENSÃO	21
2.4 CURVA PV	23
2.5 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	24
2.6 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO	26
2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
CAPÍTULO 3: CONCEITOS BÁSICOS	30
3.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	30
3.1.1 CENÁRIO ATUAL E PANORAMA FUTURO	31
3.1.2 VANTAGENS DA INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	36
3.1.3 DESVANTAGENS DA INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	37
3.2 FLUXO DE POTÊNCIA	39
3.2.1 APLICAÇÕES DO FLUXO DE POTÊNCIA	41
3.2.2 MÉTODO DE NEWTON- RAPHSON	42
3.2.3 CONTROLE DO LIMITE DE INJEÇÕES DE POTÊNCIA	44
3.3 ESTABILIDADE DE TENSÃO	44
3.4 CURVA PV.....	47
3.5 ALGORITMO GENÉTICO.....	50
3.5.1 INTRODUÇÃO	50
3.5.2 BREVE HISTÓRICO	51
3.5.3 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS ALGORITMOS GENÉTICOS	52
3.5.4 OPERADORES GENÉTICOS	54
3.5.4.1 INICIALIZAÇÃO.....	54
3.5.4.2 FUNÇÃO DE AVALIAÇÃO	54
3.5.4.3 SELEÇÃO.....	55
3.5.4.4 CRUZAMENTO	56

3.5.4.5 MUTAÇÃO	57
3.5.4.6 ATUALIZAÇÃO	57
3.5.4.7 FINALIZAÇÃO	57
3.5.5 PARÂMETROS GENÉTICOS	58
3.5.6 APLICAÇÕES	58
3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
CAPÍTULO 4: METODOLOGIA	60
4.1 INTRODUÇÃO	60
4.2 FLUXO DE POTÊNCIA.....	61
4.3 CURVA PV.....	63
4.4 TÉCNICA DO VETOR TANGENTE	63
4.5 ALGORÍTMO GENÉTICO	64
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
5.1 INTRODUÇÃO	66
5.2 FLUXO DE POTÊNCIA E CURVA PV	66
5.2.1 SISTEMA 14 BARRAMENTOS.....	66
5.2.2 SISTEMA 30 BARRAMENTOS.....	67
5.2.3 SISTEMA SUL SUDESTE.....	70
5.2.4 CURVA PV E MARGEM DE CARREGAMENTO.....	73
5.3 ALGORÍTMO GENÉTICO GENÉRICO	76
5.3.1 INTRODUÇÃO AO PROBLEMA	76
5.3.2 POPULAÇÃO INICIAL	76
5.3.3 FUNÇÃO OBJETIVO E FUNÇÃO DE AVALIAÇÃO.....	77
5.3.4 CRUZAMENTO	78
5.3.5 MUTAÇÃO.....	79
5.3.6 RESULTADOS E CONCLUSÕES	79
5.4 APLICAÇÃO DE ALGORÍTMO GENÉTICO PARA CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO SEP	82
5.4.1 BARRAMENTOS CRÍTICOS	82
5.4.2 MARGEM DE CARGA.....	83
5.4.3 POTÊNCIAS ATIVAS E REATIVAS	85
5.5 DISCUSSÕES GERAIS	87
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	88

6.1 CONCLUSÕES.....	88
6.2 TRABALHOS FUTUROS.....	89
6.3 PUBLICAÇÕES	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
ANEXO A.....	99
SISTEMA 14 BARRAMENTOS.....	100
SISTEMA 30 BARRAMENTOS.....	101
SISTEMA SUL SUDESTE.....	103

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Assim como segue a tendência mundial, o Brasil tem aderido a utilização de Geração Distribuída (GD) como forma de produzir sua própria energia elétrica. Mais de 7.000 unidades de GD estão em operação no país e é estimado para os próximos anos que esta quantidade venha subir gradativamente. (ANEEL, 2019 [A])

Tal crescimento está associado ao aumento da demanda de energia e pela busca da redução dos custos com a mesma. Além disso, a nova tecnologia beneficia também o meio ambiente, visto que novas fontes de energia podem ser utilizadas para gerar eletricidade como sol, ventos, biomassa, entre outras fontes renováveis e limpas. A inserção de tais fontes diminui a dependência da utilização de usinas térmicas, cujo custo de geração é relativamente maior e emite gases nocivos ao meio ambiente.

Muitas empresas também têm aderido à Geração Distribuída na modalidade de cogeração qualificada. Este tipo de modalidade utiliza a tecnologia de cogeração onde a partir do combustível utilizado é possível gerar mais de uma forma de energia, atendendo de maneira conjunta normas técnicas de eficiência energética. (ANEEL, 2006; ANEEL, 2018)

O advento da Geração Distribuída permitiu uma maior flexibilização do sistema de fornecimento de energia elétrica, o que também resultou em uma maior complexidade operacional e novos desafios técnicos: o sentido do fluxo de potência tradicional, originário dos sistemas de geração, transmissão e distribuição deve, agora, se complementar com o fluxo de potência proveniente dos sistemas de geração distribuída.

Aliado à complexidade devido a introdução das pequenas fontes de geração distribuída, é importante salientar que a inserção de qualquer elemento no sistema elétrico não pode causar prejuízos operacionais. O valor da potência máxima de um novo elemento a ser introduzido na rede elétrica que não causa distúrbios é denominado capacidade de hospedagem (BOLLEN, 1960). Este tipo de cálculo tem auxiliado controladores na tomada de decisão de forma a buscar uma maior eficiência na operação e planejamento da rede.

Um dos cálculos de maior relevância relacionados a qualquer sistema é a determinação do estado da rede. Este cálculo consiste essencialmente na determinação das tensões em todos

os barramentos do sistema, para uma determinada topologia, condição de geração e carga, e é denominado fluxo de potência ou fluxo de carga. (MOURA, 2016)

Atualmente as concessionárias de energia baseiam a maioria de seus algoritmos para o desenvolvimento do fluxo de potência no método de Newton-Raphson e suas variantes, que são utilizados especificamente para sistemas de transmissão. Tais sistemas são caracterizados por operar de maneira interligada, com linhas paralelas e caminhos redundantes que vão do ponto de geração ao ponto de carga, formando uma rede malhada. (CARVALHO, 2006)

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética,

“A Rede Básica de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN), que compreende as tensões de 230 kV a 750 kV, tem como principais funções: (i) a transmissão da energia gerada pelas usinas para os grandes centros de carga; (ii) a integração entre os diversos elementos do sistema elétrico para garantir estabilidade e confiabilidade da rede; (iii) a interligação entre as bacias hidrográficas e regiões com características hidrológicas heterogêneas de modo a otimizar a geração hidrelétrica; e (iv) a integração energética com os países vizinhos”. (EPE, 2017)

Qualquer alteração sofrida pelo sistema seja por contingências, manobras rotineiras ou ainda por variação de carga, pode levar o fluxo de energia à uma mudança de direção. O aumento no fluxo de potência influencia diretamente no aumento das perdas ativas e reativas nas linhas de transmissão, podendo acarretar, em um baixo perfil de tensão principalmente sob condições de carga pesada. (MALANGE, 2008)

Neste contexto, estudos de estabilidade de tensão tem auxiliado os operadores de sistemas elétricos de potência na tomada de decisão por meio das informações inerentes às mudanças de fluxo de potência, cujas características também são fundamentais para manterem a confiança nos serviços prestados e para a mitigar danos devido ao baixo suporte de potência reativa no sistema.

Outra abordagem de suma importância para o entendimento do contexto de estabilidade de tensão é a margem de carregamento, a qual representa o limite de carga que o sistema está sujeito, sem que este possa entrar em colapso de tensão, ou seja, uma quantia adicional que levaria o sistema ao seu desequilíbrio quando ultrapassado o seu limite de normal de operação. (KUNDUR, 1994)

No Brasil, o operador nacional do sistema elétrico (ONS) trata sobre a margem de estabilidade estática de tensão no seu manual de procedimentos de rede, onde traça diretrizes e

critérios para estudos elétricos. Neste manual, a sugestão é que a margem para condição normal e para situação de contingência simples deve apresentar valor maior ou igual a 6%. (ONS, 2001)

A determinação da margem de carregamento (MC) é dada pela elaboração da curva PV, que relaciona potência ativa e tensão. Esta curva é determinada por meio de sucessivas soluções do fluxo de potência.

O intuito deste Trabalho de Conclusão de Curso é determinar a quantidade máxima de geração distribuída, ou seja, a capacidade de hospedagem, que pode ser inserida em um sistema elétrico de potência (SEP) de forma a ampliar a margem de carregamento. Esta margem de carregamento, também denominada de margem de carga, é determinada pela curva PV. Com a utilização do algoritmo genético a quantidade de potência de geração distribuída é calculada, cuja função objetivo é a curva PV. Os locais para instalação dos valores de potência reativa foram determinados por meio da técnica do vetor tangente que permite calcular a área que apresenta maior deficiência de suporte de potência reativa.

A simulação computacional será desenvolvida no software MATLABR2014a, cuja licença é obtida pelo IFMG – Campus Formiga, e a metodologia proposta será testada e validada por meio de sistemas testes do IEEE e um sistema real brasileiro, onde todos os limites operacionais são considerados.

1.2 MOTIVAÇÃO

A introdução de sistemas distribuídos de energia elétrica é um reflexo da escassez dos combustíveis fósseis e da busca por maior eficiência em relação ao custo benefício de fontes de energia. Diante deste cenário, intensificou a busca por fontes energéticas alternativas renováveis que em sua maioria estão localizadas próximas aos centros de consumo, o que introduz um fator complicador ao gerenciamento operacional do sistema elétrico.

Quando pretende-se inserir qualquer tipo de fonte alternativa na rede elétrica deve-se realizar um estudo a respeito do cálculo da capacidade de hospedagem. Este cálculo trata-se da quantidade máxima de potência que é suportada pela rede. A rede tem que ser robusta o suficiente para que desvios de frequência e tensão, atuação indevida da proteção, aumento significativo da potência de curto circuito ou sobreaquecimento de seus elementos sejam evitados quando novas fontes forem implantadas.

Dentre os principais responsáveis por levar o sistema elétrico de potência à estados críticos, podem-se destacar problemas de estabilidade de tensão que são capazes de gerar interrupções parciais ou totais, de curta ou longa duração. Para que o SEP se mantenha dentro do seu limite operacional, é necessário a realização de controle de suas variáveis de maneira constante e precisa. Um ponto operativo não pode exceder a carga máxima que pode ser atendida pelo sistema elétrico.

A partir das destas considerações, algumas hipóteses podem ser formuladas:

- É possível ampliar a potência máxima de um sistema elétrico de potência com a inserção de geração distribuída? Se a resposta for positiva ainda pode-se questionar:
- Qual a quantidade de geração distribuída, capacidade de hospedagem, pode ser inserida no sistema com a finalidade de aumentar a distância entre o ponto de operação nominal e o ponto de máximo carregamento?
- É possível calcular a capacidade de hospedagem de geração distribuída por meio de técnicas evolutivas?

1.3 OBJETIVO PRINCIPAL

Com o intuito de responder as hipóteses levantadas no parágrafo anterior, propõe-se como objetivo principal deste trabalho um método de otimização da capacidade de hospedagem de geração distribuída de sistemas elétricos de potência baseado em algoritmo genético, implementado em MATLAB2014a.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para se atingir o objetivo principal, metas intermediárias (objetivos específicos) foram estabelecidas, tais como:

- Confeccionar uma revisão bibliográfica expondo temas pertinentes ao assunto a ser abordado;
- Determinar a margem de carregamento dos sistemas teste propostos;
- Obter por meio do algoritmo genético o ponto ótimo da ampliação da margem de carregamento por meio da inserção de geração distribuída nos sistemas teste;

- Identificar os barramentos críticos que devem ser inseridos a geração distribuída.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Os Capítulos 2 e 3 destinam-se à apresentação da revisão bibliográfica e os conceitos básicos pertinentes para o entendimento do tema abordado e suas especificidades, respectivamente.

A metodologia proposta e sua aplicação nos sistemas teste são abordadas no Capítulo 4 desta dissertação.

Posteriormente, os resultados obtidos através da metodologia aplicada são expostos no Capítulo 5, e por fim, as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 6, assim como as informações dos sistemas-testes utilizados, que estão contidas na seção de Anexos.

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é destinado à apresentação da revisão bibliográfica de trabalhos existentes nas áreas de Sistemas Elétricos de Potência, Fluxo de Potência, Estabilidade de Tensão, as curvas de máximo carregamento (denominadas curvas PV's), Geração Distribuída e Técnicas de Otimização.

2.1 INTRODUÇÃO AO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

É de conhecimento geral que o sistema elétrico de potência trata-se de um conjunto de instalações e equipamentos cuja finalidade é atender a carga elétrica conectada à rede. Composto por setores como a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, cujas características pertinentes devem ser conhecidas como forma de se obter um melhor aproveitamento de seus recursos. (TORTELLI, 2009)

A partir da Figura 1, a seguir, é possível identificar os setores que compõem o sistema elétrico de potência com maior clareza.

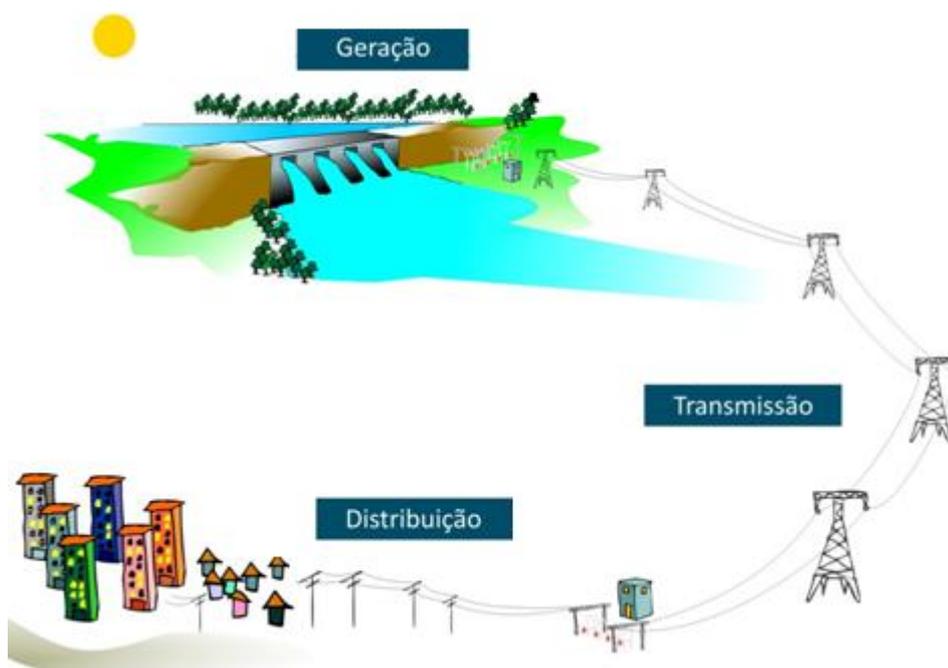


Figura 1: Setores que compõem o sistema elétrico de potência.

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2019 [C]).

Tendo em vista a necessidade de se conhecer o SEP de maneira minuciosa, MARTÍNEK *et al.* (2014) aborda o surgimento do sistema elétrico e toda sua complexidade. Além disso, casos que resultaram em colapso da rede e possíveis problemas futuros em potencial são discutidos.

O SEP está sujeito às diversas contingências como alteração de carga, curto-circuitos, comutação de equipamentos de proteção ou até mesmo de automação, desligamento e faltas, dentre outros. Diante dessas ocorrências, SOBOLEVSKIS & ZICMANE (2016) propõe um método para detectar parâmetros da rede que são mais vulneráveis aos fenômenos externos, com o intuito de utilizar tais informações em um melhor controle do sistema elétrico, diminuindo oscilações operacionais causadas por algum tipo de perturbação.

Já KUDAL *et al.* (2016) desenvolve análises de desempenho de barramentos SMIB (“Single Machine Infinite Bus” ou “única máquina síncrona conectada ao barramento infinito”) e IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos) por meio dos *softwares* Mi- Power, Simulink e PSAT do MATLAB. O objetivo é aprimorar a segurança e confiabilidade do sistema elétrico de potência. As simulações são avaliadas por meio do sistema teste de 5 barramentos do IEEE.

A estrutura do setor energético vem sofrendo alterações constantes, principalmente em se tratando de novas formas de gerar energia. Por isso, usinas convencionais têm buscado maior flexibilidade em muitos de seus processos e equipamentos, visando principalmente à modernização.

Dentro deste aspecto, a troca de reguladores automáticos de tensão (Automatic voltage regulators - AVR) tem sido uma tendência. ZIMMER *et al.* (2017) desenvolveu uma otimização de AVR ao utilizar modelagem dinâmica não linear cujos parâmetros representam o sistema de excitação e as características do SEP para chegar ao mais próximo possível do comportamento prático. A otimização é feita com a técnica de enxame de partículas, cuja função é ajustar os parâmetros do controlador do AVR a fim de melhorar o comportamento da tensão transiente.

Com o aumento da demanda e a limitação em construir novas linhas de transmissão, devido ao impacto ambiental e econômico, é necessário o desenvolvimento de ferramentas para controle e monitoramento do sistema, bem como a busca por fontes alternativas para geração de energia limpa e renovável.

A energia eólica é uma das principais fontes de energias renováveis em ascensão atualmente. No entanto, sua utilização proporciona alguns impactos no sistema elétrico como, por exemplo, flutuação de tensão e frequência causadas pela intermitência de sua geração. Adentrando neste seguimento, TESHAGER *et al.* (2018) apresenta um sistema de armazenamento bombeado direto como estratégia para controle de potência e utiliza como base a técnica do modelo fasorial. A finalidade é uma metodologia de controle por meio de VSPS (Variable Speed Pumped Storage ou Armazenamento Bombeado de Velocidade Variável) para alcançar frequência e tensão estáveis para o sistema.

DU *et al.* (2015) avaliou os impactos causados na estabilidade angular do sistema elétrico quando sujeito à conexão de um parque eólico de grande escala. Para este fim, foi considerado duas formas de conexão à rede do parque eólico: a primeira trata-se da inserção deslocando geradores síncronos e a segunda adiciona-se tais geradores diretamente ao sistema de energia. Neste trabalho foi analisado parâmetros como a mudança do fluxo de potência, bem como o impacto da interação dinâmica do parque eólico com os geradores elétricos. Por fim apresenta um exemplo do SEP conectado à rede de um parque eólico a fim de expor a metodologia proposta.

Para que seja possível a implantação de tecnologias como energia eólica e outras fontes renováveis, é inevitável a necessidade do uso de elementos de eletrônica de potência. O IEEE recomenda algumas práticas de engenharia para a aplicação destes elementos nos sistemas de energia, seja ele *onshore* ou *offshore* (“na costa” ou “fora da costa”). O objetivo do documento é traçar uma metodologia que especifica padrões para equipamentos de eletrônica de potência quando utilizados no SEP. Desta forma, essa especificação do IEEE permite a análise de impactos de tais componentes ou até mesmo sistemas integrados de energia levando em consideração custo, peso, eficiência e risco de implementação. (IEEE, 2017).

As modificações do SEP como a construção de redes inteligentes e tecnologias para o armazenamento de energia trouxeram a necessidade de realizar estudos sobre o ajuste e controle de potência ativa, visto que este meio se tornou mais atrativo que o controle feito por meio de potência reativa, que utiliza por exemplo SVC e STATCOM. Desta forma QIN *et al.* (2014) realizou um estudo sobre tal tecnologia baseada em armazenamento de energia e suas aplicações voltadas para a estabilidade e ajuste de tensão do sistema. Por fim, desenvolveu um controle eletromecânico de ajuste e controle de potência ativa e realizou simulações onde é possível configurar os principais parâmetros utilizados.

Ainda considerando ações de controle que alteram o ponto de equilíbrio operacional de um sistema elétrico, SHU & TANG (2017) propõe uma série de medidas e requisitos para garantir a segurança, confiabilidade e estabilidade do setor elétrico da China. Para implementar tais medidas, faz-se uma análise dos padrões seguidos atualmente e então, obtém-se as principais deficiências apresentadas pelo sistema para que direcionamentos sejam traçados e praticados futuramente.

Para que se possa estudar o Sistema Elétrico de Potência de maneira precisa e eficaz é necessário a obtenção de parâmetros de toda a rede e assim, realizar devidas análises para que seja possível a tomada de decisões. Uma ferramenta indispensável para obter esse tipo de informação é o cálculo do fluxo de potência, que é capaz de determinar o ponto operativo do sistema elétrico. A seção subsequente apresenta estudos relacionados à ferramenta mencionada.

2.2 FLUXO DE POTÊNCIA

O fluxo de potência é desenvolvido como uma forma de avaliar o estado do sistema elétrico. Desta forma, pode ser utilizado em diversas áreas com a finalidade de melhorar o planejamento e controle do mesmo.

Dentro deste contexto, GUOYONG *et al.* (2017) analisa o fluxo de potência cujos dados são empregados na elaboração do cronograma do dia seguinte, fato de suma importância na operação da rede elétrica. Esta análise leva em consideração aspectos como consistência dos resultados e valores planejados, bem como a racionalidade do fluxo de potência ativa e reativa.

REN *et al.* (2016) examina a capacidade de controlar o fluxo de energia por meio da inserção do controlador de fluxo de potência unificado (Unified Power Flow Controller- UPFC) em uma linha de transmissão real. Para tal, realiza análise da rede, por meio do fluxo de potência, com dados operacionais e posteriormente com o UPFC instalado. Após o estudo, inclui o fluxo de potência ótimo (OPF) para demonstrar a influência de UPFC nos resultados.

Posteriormente e na mesma linha de pesquisa, YANG *et al.* (2017) propõe um fluxo de potência baseado na metodologia de injeção de potência e o algoritmo de Newton-Raphson também para análise de inserção de UPFC na rede.

Com a inserção de energias renováveis no sistema elétrico alguns desequilíbrios podem ser causados como a reversão dos fluxos de energia nos alimentadores. Assim, NATORI *et al.*

(2017) realiza a análise do controlador de fluxo de potência bidirecional (Bi-directional Power Flow Controller - BPFC) utilizando o conversor *buck-boost* para microrredes DC. Dentro das análises também estuda o controlador de fluxo de energia multiponto (Multipoint Power Flow Controller- MTPFC), o controlador de fluxo de potência bidirecional flutuante (Floating Bi-directional Power Flow Controller - F-BPFC) e controlador de fluxo de energia multiterminal flutuante (Floating Multi-Terminal Power Flow Controller - F-MTPFC). A justificativa para o estudo é que os problemas oriundos da reversão do fluxo de potência causam aumento das perdas de distribuição e aumento de tensão nos alimentadores.

YANG *et al.* (2015) enfatiza a abordagem da turbina eólica no cálculo do fluxo de potência, bem como características de frequência de energia após a sua inserção no sistema de energia. A metodologia é baseada na linguagem Fortran e considera a turbina eólica como barramento PQ (Potência ativa *versus* Potência reativa), fato que torna o modelo apropriado para o cálculo dinâmico do fluxo de potência.

No decorrer deste tópico é possível notar que a utilização do fluxo de potência é ampla e abrange vários problemas do sistema elétrico, visto que o cálculo proporciona diversas variáveis de suma importância para a estabilidade e operação adequada do sistema como um todo.

Como qualquer sistema, o SEP está sujeito à diferentes tipos de perturbações durante seu funcionamento e a área de estabilidade é a responsável por estudar e analisar o comportamento da rede. Quando o foco é o nível de tensão de operação, tem-se a sub-área de estabilidade de tensão. A seção a seguir aborda trabalhos da literatura que realizam estudos desta natureza.

2.3 ESTABILIDADE DE TENSÃO

A preocupação com a estabilidade de tensão tem sido crescente devido à elevação da demanda e complexidade do sistema elétrico.

Tendo em vista que uma das principais causas de colapso de tensão é o desequilíbrio entre geração de reativo que, conseqüentemente leva a queda de tensão do sistema, dispositivos FACTS (Flexible AC Transmission Systems ou Sistemas Flexíveis de Transmissão AC) e sistemas de geração distribuídas estão sendo utilizados. Desta forma, em BHATTACHARYA

& BISWAS (2017) propõe a utilização de um índice de estabilidade de tensão baseado na rede equivalente de Thevenin para evitar a utilização do método continuado do fluxo de potência. Além de determinar o barramento mais fraco do sistema, também realiza a incorporação ótima de elementos FACTS e de geração distribuída para melhorar a estabilidade de tensão.

Na mesma linha, MUSTAFFA *et al.* (2016) faz o gerenciamento de carga reativa para o controle da estabilidade de tensão utilizando programação evolutiva como forma de otimizar tal gerenciamento. Para avaliar a segurança de tensão utiliza o índice de estabilidade de voltagem rápida (Fast Voltage Stability Index - FVSI).

O aumento da demanda de energia é o fator principal para análises de estabilidade de tensão, sendo assim, CUI *et al.* (2017) estuda a rede elétrica de Xangai, rede de grande recebimento de energia devido ao aumento de demanda constante, com base na estabilidade de tensão com o propósito de melhorar a segurança e funcionamento da rede. Tais estudos levam em consideração o período temporal (verão e inverno) e modo de operação (normal e contingências).

Em contrapartida, ZUO *et al.* (2017) investiga a estabilidade de tensão transiente na rede elétrica em Hunan, também na China, cuja rede elétrica apresenta problemas de estabilidade de tensão. A inserção de uma nova linha de alta tensão DC (UHV-DC) com início em 2017, elevou a preocupação com o risco de colapso de tensão. Assim, é feito um estudo de estabilidade de tensão nesta nova rede de Hunan com o objetivo de identificar a deficiência e a localidade onde deve-se inserir compensadores de potência reativa da rede elétrica.

Existem diversos métodos e índices matemáticos que possibilitam a análise da estabilidade de tensão, no entanto alguns trabalhos têm realizado esta análise a partir de propostas de novos índices de estabilidade de tensão. Em USAMA *et al.* (2017), o índice de estabilidade de tensão desenvolvido é baseado nas técnicas de aprendizado de máquina (regressão linear, rede neural e árvore de decisão) para mitigar o fenômeno de colapso de tensão e em CHEN *et al.* (2017) a proposta é de um novo índice de estabilidade de tensão aplicado para sistemas de distribuição, com base na raiz dos alimentadores. A premissa do estudo é atrelada à quantidade de ventos que geração eólica está sujeita, cuja potência gerada pode ser máxima e reduzir a capacidade de regulação da tensão do alimentador que, conseqüentemente, pode levar o sistema à um colapso de tensão. Para tal, utiliza dados como fasores de tensão do barramento, parâmetros de linha e equações quadráticas do fluxo de potência. Tal índice pode quantificar a margem de estabilidade de tensão do nó em tempo real.

Todos os documentos citados demonstram que a necessidade de maior confiabilidade e segurança do sistema elétrico resulta diversos estudos ligados a estabilidade de tensão, pois a constante evolução do SEP pode acarretar sérios problemas como colapso de tensão da rede.

Todo estudo de estabilidade de tensão inicia-se com o cálculo do fluxo de potência onde é possível saber o estado inicial do sistema antes da ocorrência da contingência. Uma das ferramentas mais utilizadas em estudos de estabilidade de tensão é a Curva PV. Esta curva é formada por sucessivas resoluções do fluxo de potência, cujo traçado possibilita determinar a carga máxima que pode ser atendida pelo sistema. Tal curva é mencionada na próxima seção.

2.4 CURVA PV

Em LIN *et al.* (2011) é apresentado um estudo sobre o impacto do controle de tensão do rotor na curva PV de um Gerador de Indução Duplamente Alimentado (Double Fed Induction Generator - DFIG), tecnologia utilizada para a geração eólica de energia. Em conjunto, realiza uma proposta de um controlador de curva PV para o desenvolvimento de tal estudo onde é verificado uma bifurcação na região de operação instável da curva PV que pode ser reparada por meio da regulação de tensão do rotor possibilitando uma melhora na geração de energia e maior controle durante uma emergência.

A geração distribuída como citado nos tópicos anteriores, dependendo da sua localização e tamanho, além de melhorar a estabilidade de tensão reduz as perdas no sistema. Assim, o artigo de BANEJAD & KAZEMINEJAD (2017), mostra por meio da curva PV o efeito característico destas cargas utilizando o índice de estabilidade de tensão modificada (Modified Voltage Stability - MVS) para analisar a estabilidade de tensão no sistema teste de 34 barramentos do IEEE.

KAMARUZZAMAN *et al.* (2014) utiliza a curva PV e o índice de estabilidade de tensão melhorado com a finalidade de analisar e determinar o impacto do sistema fotovoltaico, quando integrado à rede, em relação à estabilidade de tensão estática.

No método proposto por KARBALAEI *et al.* (2011), a parte inicial da curva PV é aproximada com uma função quadrática por medições de potência ativa e tensão sucessivas. Tal função é comparada com as características da carga e então obtém-se o ponto de colapso de

tensão. A proposta visa antever um colapso de tensão para cargas dependentes de tensão, onde o ponto de colapso não coincide com o ponto de máximo carregamento da curva.

CHEN *et al.* (2015) propõe um novo método para traçar a curva PV denominado método de serie de potência (PSM) e determinar o ponto de colapso do SEP. Ao ampliar a equação do PSM, obtém-se um novo ponto na curva, podendo este ser em direção ascendente ou descendente. Assim, duas metades da curva PV são traçadas e a interseção destas corresponde ao ponto de colapso. O autor refere-se ao método como mais robusto quando comparado ao método convencional de continuação.

O sistema de geração distribuída resultou em uma maior complexidade do sistema elétrico. Com isso, os estudos de estabilidade estão sendo adaptados para este novo cenário. A seção a seguir apresenta alguns trabalhos publicados sobre a inserção desta nova configuração, bem como os impactos por ela causados.

2.5 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Os incentivos regulatórios estão cada vez mais fomentando o aumento de geração distribuída no país. Em consequência disto, muitos estudos estão sendo elaborados como forma de analisar os impactos causados pela inserção constante de tais tecnologia no sistema elétrico.

BRESSAN (2016) faz um estudo do futuro de geração distribuída na região norte do país dando ênfase em fontes como a energia solar, eólica e hidráulica de pequeno porte. O objetivo é analisar a viabilidade de se instalar unidades de geração em tais localidades cujo potencial é alto e não muito explorado. E BORGES (2017) estuda o panorama de geração distribuída atual e realiza uma revisão bibliográfica dentro do tema em questão, buscando observar as dificuldades ainda existentes para consolidar a tecnologia no país.

NARUTO (2017) também realiza uma análise geral da inserção de geração distribuída na rede elétrica. Abrange ao longo do trabalho benefícios e malefícios da instalação da nova forma de gerar energia elétrica com base não só em aspectos técnicos como também econômicos, políticos e sociais. Além disso, estuda a inserção de um sistema de microgeração fotovoltaica, a fonte de maior ascensão de GD levando em consideração desde o local de instalação até a escolhas dos componentes de geração (módulos fotovoltaicos e inversores), como sistema de proteção e conexão à rede elétrica.

Estudando também a GD com fontes de energia fotovoltaica, SOUZA *et al.* (2018) parte da premissa de se explorar os impactos causados pela inserção de GD voltados para o parâmetro do fator de potência. Visto que a alteração da incidência solar ao longo da geração, pode causar flutuações na quantidade de energia gerada, realiza-se a análise de injeção de potências ativas e reativas nas redes de distribuição que são conectados a geradores fotovoltaicos distribuídos, tendo como base medições extraídas de sistemas reais brasileiros.

Já SALGADO (2015) tomou como base de estudo os impactos da inserção sobre correntes de curto circuito e o sistema de proteção das redes de média tensão. Para tal, utiliza um método paramétrico que permite analisar os limites de potência em função dos impactos admissíveis do ponto de conexão e da rede. Dentro deste contexto SGUAÇABIA (2015) também estuda o impacto de GD para o sistema de proteção, no entanto, para sistemas sob operação em ilha onde o objetivo é adequar o sistema a nova configuração proporcionando melhoria na estabilidade.

Ainda sob o aspecto de proteção do sistema, PRIYA & GEETHANJALI (2018) desenvolve um método para analisar e melhorar o comportamento da proteção e coordenação da rede para um sistema interconectado à geração distribuída, que possui como fonte a energia eólica. O principal objetivo é encontrar uma solução adequada para o sistema interligado analisando o disparo de relé em condição normal e de falha pelo método das impedâncias. A plataforma para realizar o método proposto é o MATLAB/Simulink.

Sabendo que a inserção de geração distribuída leva a distorções harmônicas devido principalmente a utilização de dispositivos de chaveamentos presentes em fontes como fotovoltaica e eólica, muitos estudos relacionados a solucionar este tipo de problema estão sendo realizados. SHAHID (2015) realiza a comparação de conteúdo harmônico utilizando técnica de modulação por largura de pulso (Sinusoidal Pulse Width Modulation - SPWM) e por largura de pulso vetorial (Space Vector Pulse Width Modulation - SVPWM) em sistemas distribuídos. Além disso, implementa um método para regular a tensão e a frequência por meio de funções de inclinação personalizadas.

Outra forma de lidar com harmônicos é apresentada em BABU & RAO (2017) que utiliza filtros de potência ativa paralelos (Active Power Filters - APF duplo) como forma de eliminar os harmônicos presentes na rede de distribuição cujas cargas não são lineares e apresentam geração distribuída. Tal filtro é controlado por simulação através da plataforma

MATLAB/Simulink realizando a comparação quando se insere dois filtros APF com e sem a presença de geração distribuída na rede.

A inserção de geração distribuída culminou em sistemas de maiores complexidades onde recorrer a técnicas de otimização, que possibilitem análises mais eficazes unindo parâmetros fundamentais, tornou-se uma solução ótima cuja finalidade é conhecer e dimensionar melhor o sistema como um todo.

Em DULĂU (2014) uma técnica de otimização para sistemas de geração distribuída é apresentada considerando parâmetros de custos de geração e perda de energia com base no fluxo de potência ótimo. Também propõe a automação e controle da rede utilizando o software SCADA para seu desenvolvimento, onde são inseridos dados de carga e unidades geradoras disponíveis no sistema.

Já MATVOZ *et al.* (2017) realiza uma otimização na regulação de potência reativa com o intuito de manter a tensão, em redes de baixa tensão, constante e também minimizar as perdas do sistema. Para isso, compara parâmetros como variação de tensão e potência reativa, bem como potência ativa e perdas do sistema a fim de observar possíveis melhorias após a implementação da metodologia proposta.

Ao longo do tema abordado observa-se que a geração distribuída tem sido cada vez mais estudada no decorrer dos anos e o principal objetivo é relacionado ao impacto provocado pela sua inserção no sistema elétrico de potência, visto que ainda é uma incógnita todos os efeitos por ela causados.

Na próxima seção serão abordadas diferentes técnicas de otimização que foram estudadas na literatura, bem como o uso do algoritmo genético para solucionar problemas complexos como a inserção de geração distribuída no sistema elétrico.

2.6 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO

Uma das técnicas de otimização mais utilizadas na atualidade é a de enxame de partículas (do inglês, PSO - Particle Swarm Optimization) e seus derivados, por se tratar de uma técnica precisa e de rápida velocidade de convergência.

A técnica de otimização foi desenvolvida por Kennedy e Eberhart, e é baseada na análise comportamental dos pássaros a procura por alimento. Trata-se de uma técnica da computação

evolutiva cujo espaço de busca manipula um conjunto de prováveis soluções, que, por meio da cooperação e competição entre estas, resultarão em uma solução ótima do problema. (RIZZI et al, 2016)

Assim, ZHIJIAN *et al.* (2016) trata de uma otimização da análise do fluxo de potência na rede de distribuição, considerando a presença de geração distribuída, por meio de um algoritmo de enxame de partículas aprimorado. A função objetiva é baseada na perda mínima na rede e para simulação computacional utiliza o sistema de 14 barramentos do IEEE implementado no *software* MATLAB.

JOBANPUTRA & KOTWAL (2018) também utiliza otimização do enxame de partículas para minimizar o custo total de geração de energia. A metodologia é testada no sistema teste do IEEE de 39 barramentos.

A utilização de energia limpa tem avançado muito nos últimos anos. No entanto, problemas como a absorção de tal energia, a configuração econômica e confiabilidade motivaram em XIA *et al.* (2017) a necessidade de se desenvolver uma otimização com algoritmo de enxame de partículas multiobjetivo baseado em modelos (MOPSO) para solucionar tais problemas. A solução ótima é determinada de acordo com a aglomeração de partículas e além disso, utiliza um mecanismo de escape de probabilidade com o intuito de melhorar a busca do algoritmo.

Dentro desta linha de raciocínio, HU *et al.* (2018) tem como objetivo de otimização melhorar a confiabilidade e economia do sistema de energia através de simulações por meio do algoritmo de enxame de partículas de recozimento. Para tal combina o processo de recozimento com a otimização do enxame de partículas (SA-PSO) utilizando o MATLAB. Por fim, os resultados são comparados aos do software HOMER.

LIU *et al.* (2017) utiliza algoritmo caótico de busca livre (CFS) para solucionar problemas com otimização de geração distribuída. O intuito é conciliar confiabilidade e eficiência da fonte de energia com o tamanho da mesma. Para que a busca seja eficiente é realizada dentro dos indivíduos de maneira a se evitar os mínimos locais e também se utiliza o elitismo como forma de acelerar a convergência do método utilizado.

Muitas técnicas de otimização são inspiradas na natureza sendo estas o algoritmo morcego, algoritmo vagalume e algoritmo genético, sendo o último inspirado na teoria da evolução das espécies.

Com o intuito de amortecer as oscilações do sistema de potência causadas quando algumas máquinas apresentam falhas, ISLAM *et al.* (2013 [A]) propõe uma otimização utilizando uma técnica conhecida como BATOA (*BAT Optimization Algorithm*, ou algoritmo morcego) que é inspirada na natureza. Esta técnica é empregada para encontrar os melhores parâmetros para um projeto otimizado do Power System Stabilizer (PSS). Os valores encontrados são comparados à técnica de enxame de partículas para analisar a eficácia do BATOA.

No mesmo seguimento de melhorar o amortecimento e proporcionar estabilidade ao sistema elétrico, ISLAM *et al.* (2013 [B]) emprega uma técnica de otimização metaheurística denominada algoritmo vagalume, ou *Firefly Algorithm* (FA), com a finalidade de buscar melhores parâmetros para controladores de dispositivos FACTS como o SVC. Os resultados obtidos com o *Firefly* são comparados utilizando a técnica de enxame de partículas.

Os algoritmos genéticos (AG's) são métodos de otimização largamente utilizados quando se deseja obter a melhor solução para um problema específico.

LEAL (2017) utiliza o algoritmo genético como forma de estimar a quantidade e localização de possíveis inserções de capacitores shunt na rede com a finalidade de se aumentar a margem de carregamento do sistema elétrico.

Já SOUZA (2008) aplica o algoritmo genético para estimar harmônicos no sistema elétrico e problemas relacionados ao sistema de proteção. No primeiro objetivo, o AG estima os harmônicos de até vigésima quinta ordem e são comparados aos resultados de quando utilizados a Transformada de Fourier. No segundo objetivo, o AG identifica os fasores de corrente e tensão fundamentais para obter a impedância do relé de distância.

ALAM & DE (2016) recorre a um tipo de algoritmo híbrido baseado em algoritmo genético (HLGBA) para solucionar problemas de despacho de energia reativa como forma de diminuir a perda de energia ativa do sistema de potência. Neste caso, o algoritmo genético utiliza somente o espaço para pesquisa global e depois realiza busca local para filtrar a solução. A simulação é feita no sistema IEEE14 analisando parâmetros como eficiência e tempo de processamento.

Outra proposta é a otimização com algoritmo genético com a finalidade aperfeiçoar o despacho de carga de unidades geradoras de usinas térmicas, com o intuito de reduzir o

consumo do combustível sem deixar de atender a demanda requisitada. A função do algoritmo é ajustar a curva característica do consumo de carvão. (WEN & CHEN, 2017)

WU *et al.* (2018) apresenta um melhoramento no algoritmo genético tradicional como forma de aumentar a velocidade de convergência e diminuir problemas de convergência prematura. A proposta apresentada é utilizar características de otimização de potência reativa do SEP e demais parâmetros do algoritmo genético convencional refinados. A metodologia é testada em sistemas IEEE14 e IEEE30.

Neste tópico nota-se que o algoritmo genético e demais técnicas abordadas podem ser utilizadas em diferentes temáticas com o mesmo intuito: a busca pela otimização e melhor solução do problema proposto, auxiliando na resolução de problemas de maiores complexidades.

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os tópicos abordados ao longo deste capítulo discorrem sobre diversas pesquisas realizadas dentre os temas a serem tratados nesta dissertação. Pode-se observar que tais conteúdos são largamente estudados e inúmeras são as inovações nesta área de conhecimento.

É possível justificar por meio de trabalhos publicados a importância de se realizar estudos destinados a determinar a capacidade de hospedagem da rede elétrica, mais ainda devido a tendência da inserção do novo tipo de geração de energia.

Os assuntos aqui mencionados serão explanados com maiores detalhes no próximo capítulo, cujo intuito é apresentar os conceitos básicos para o entendimento deste trabalho de conclusão de curso.

CAPÍTULO 3: CONCEITOS BÁSICOS

Neste capítulo é realizada a introdução dos conceitos básicos pertinentes à elaboração deste trabalho de conclusão de curso, abordando temas como Geração Distribuída, Fluxo de Potência, Estabilidade de Tensão, Curva PV e Algoritmo Genético.

3.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Segundo o Instituto Nacional de Eficiência Energética,

“Geração Distribuída (GD) é uma expressão usada para designar a geração elétrica realizada junto ou próxima do(s) consumidor(es) independente da potência, tecnologia e fonte de energia.” (INEE, 2018)

A geração distribuída inclui:

- Co-geradores
- Geradores que usam como fonte de energia resíduos combustíveis de processo;
- Geradores de emergência;
- Geradores para operação no horário de ponta;
- Painéis fotovoltaicos;
- Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH's.

Inicialmente, a maior quantidade de energia elétrica produzida era gerada e utilizada localmente, no entanto, com o advento das centrais de grande porte o custo de energia se tornou economicamente viável e, portanto, houve a diminuição da utilização das unidades geradoras próximas aos centros consumidores. (INEE, 2018)

Com a crise do petróleo intensificou-se a necessidade pela busca de alternativas para geração de energia elétrica com a exploração de recursos naturais renováveis e de novas tecnologias que realizem a modificação dos processos com a finalidade de aumentar a eficiência energética. Tal busca, permitiu uma reforma do setor elétrico e estimula a concorrência no mercado de energia proporcionando como consequência preços competitivos aos consumidores. (INEE, 2018)

3.1.1 CENÁRIO ATUAL E PANORAMA FUTURO

Atualmente, a matriz energética brasileira conta com 7.291 empreendimentos em operação, que totalizam em uma potência instalada de 162.932.376 kW. Na Figura 2, a seguir, pode-se observar a distribuição da matriz por tipo de fonte. (ANEEL, 2019 [A])

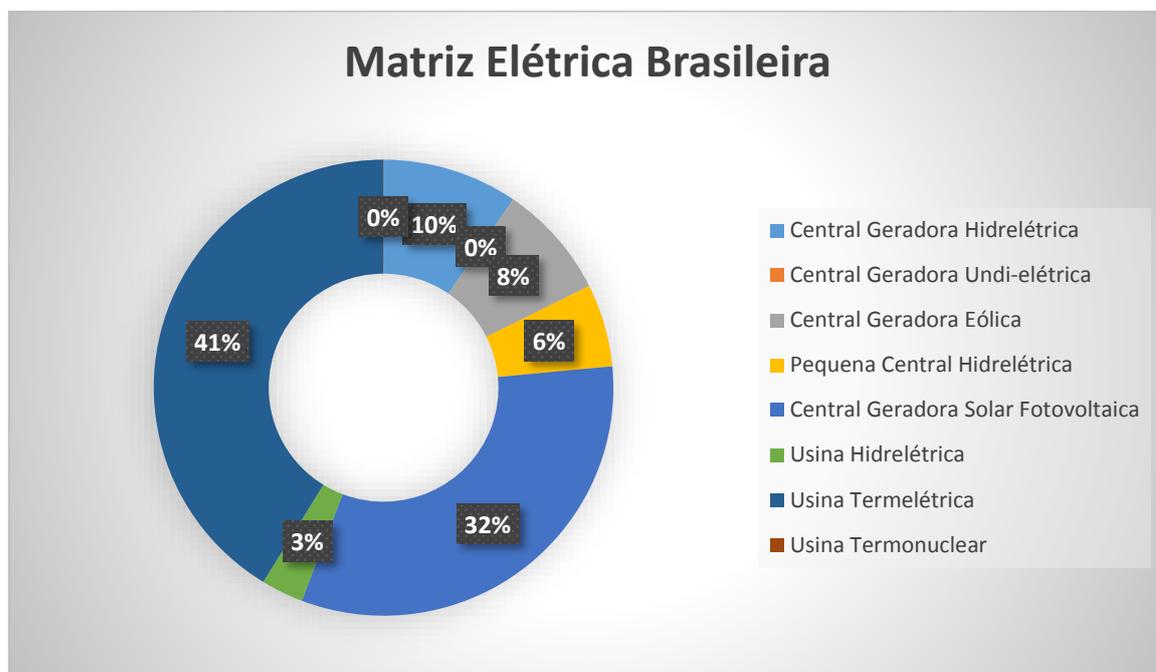


Figura 2: Matriz energética brasileira.

Fonte: Extraído do banco de dados de geração (ANEEL, 2019 [A])

A partir do ano de 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) colocou em vigor uma resolução normativa que possibilita a qualquer consumidor gerar sua própria energia elétrica seja ela utilizando fontes renováveis ou cogeração qualificada. Para tal, regulamenta o termo de micro e minigeração distribuída que corresponde a centrais geradoras com potência instalada de até 75kW para a primeira e potência instalada maior que 75kW e menor que 5MW para a segunda. (ANEEL, 2015)

Com base nos dados fornecidos pela ANEEL, atualmente a maior quantidade de geração distribuída no país provém da energia solar fotovoltaica. Conforme tratada na Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL, dentro da geração de energia distribuída, a fonte solar fotovoltaica é a que mais se destaca atualmente, contando com cerca de 99% de toda quantidade de geração distribuída, seguida pelas fontes eólica, biogás, hídrica, biomassa e cogeração qualificada, como pode ser observado pelo gráfico da Figura 3. (ANEEL, 2017)

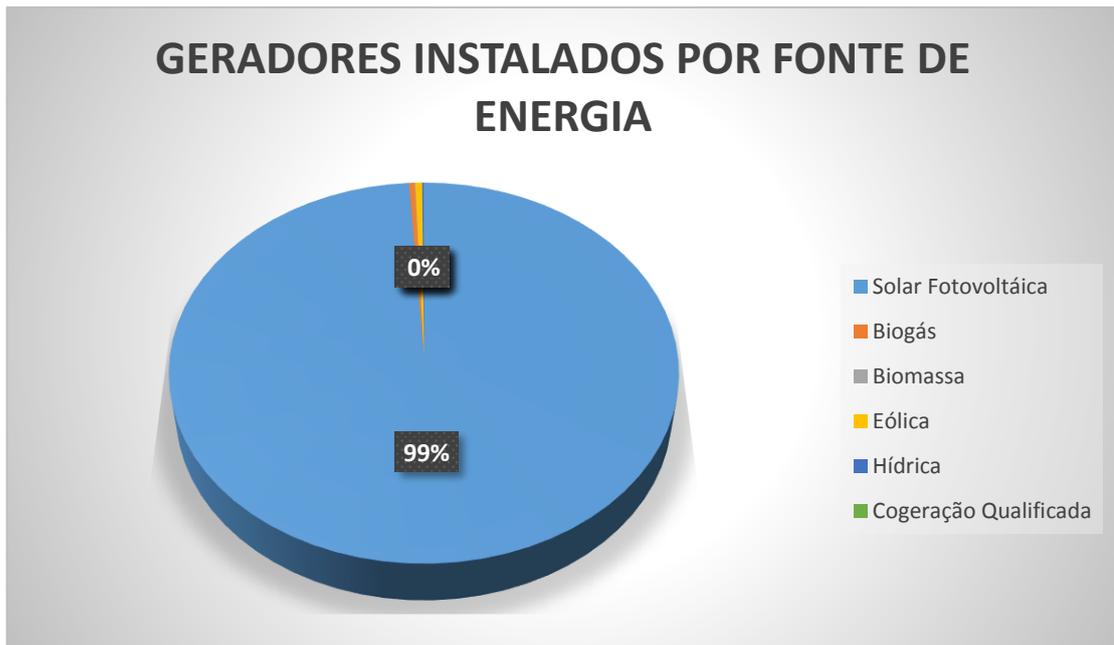


Figura 3: Geradores instalados por fonte de energia.

Fonte: Dados extraídos de Nota Técnica n° 0056/2017-SRD/ANEEL (ANEEL, 2017)

A motivação de tamanho crescimento pode ser explicada pela quantidade de irradiação solar presente no país e também pela evolução dos preços das placas solares como pode ser observado pelas Figuras 4 e 5, respectivamente.

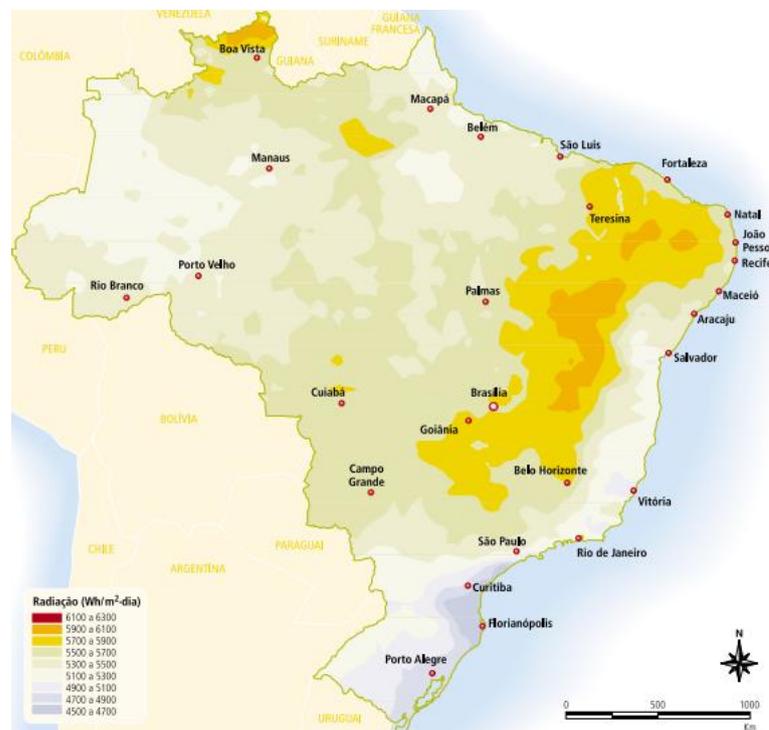


Figura 4: Mapa da irradiação solar no Brasil.

Fonte: Extraído de [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf)

O Brasil é um dos países que apresentam maior índice de radiação solar, cuja média de irradiação anual está entre 4.500 e 6.100 Wh/m², valores muito maiores que alguns países como Alemanha onde a energia solar fotovoltaica é bastante implantada. Pelo mapa, percebe-se que a região nordeste é a que apresenta maior índice dentre todas as regiões do país.

Além do grande potencial de irradiação solar, outro fator que culminou no crescimento da geração de energia pela fonte solar é a evolução dos preços da placa fotovoltaica, maior contribuinte para o encarecimento da disseminação da tecnologia.

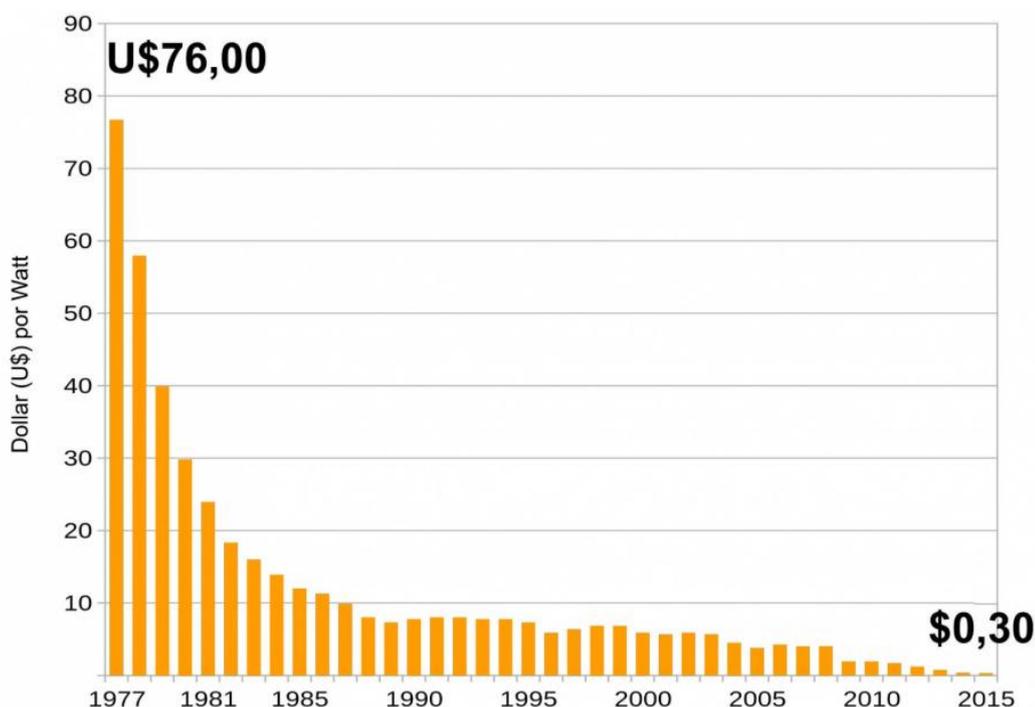


Figura 5: Evolução dos preços da energia solar fotovoltaica.

Fonte: Extraído de <https://www.portalsolar.com.br/placa-solar-preco.html>

A Figura 5 mostra a evolução dos preços da placa solar pelo gráfico de dólar por Watt. No início de sua utilização o preço era elevado e atualmente os valores encontram-se mais acessíveis tornando a tecnologia mais atrativa para os consumidores.

A Associação Brasileira de Geração Distribuída (ABGD) disponibiliza dados quanto a utilização da geração distribuída por localidade. A Figura 6 abaixo apresenta estes dados que foram baseados também pela ANEEL.

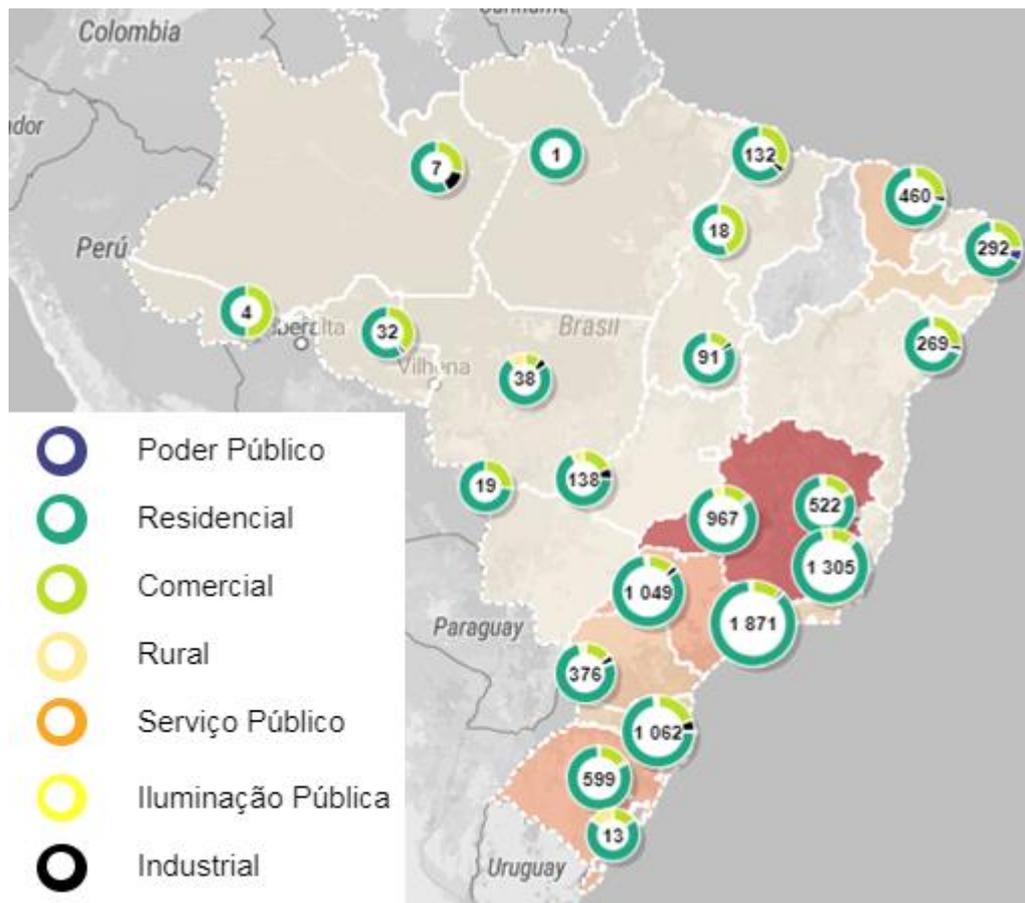


Figura 6: Quantidade de Usina de geração distribuída no Brasil.

Fonte: Adaptado de ABGD.

Nota-se que a maior concentração de usinas de geração distribuída está situada principalmente na região sudeste e sul do país, se destacando os estados de Minas Gerais e São Paulo. Além disso, também é possível observar que o uso de tal fonte é voltado principalmente à consumidores residenciais e comerciais.

Tendo em vista o crescimento de tal geração, a ANEEL criou um gráfico de tendência do crescimento da geração distribuída, voltada para a utilização de energia solar, no país de 2017 à 2024, apresentado pela Figura 6, a seguir:

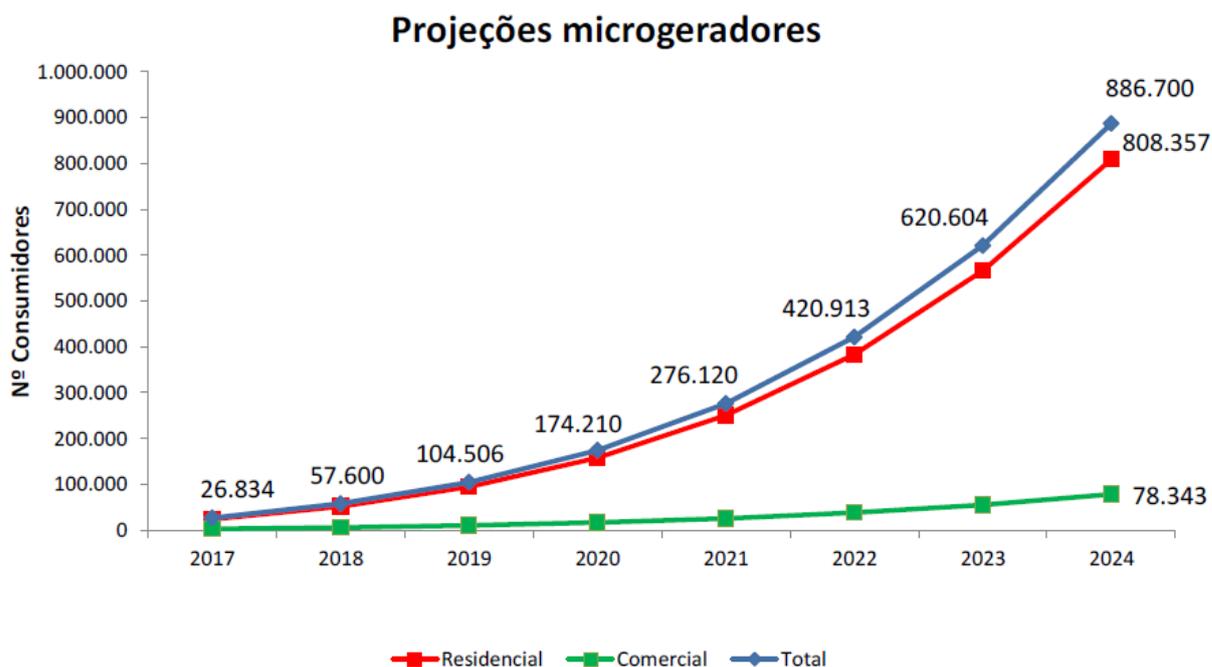


Figura 7: Gráfico de projeção de microgeradores instalados entre 2017 e 2024.

Fonte: Extraído de de Nota Técnica n° 0056/2017-SRD/ANEEL (ANEEL, 2017)

Como vê-se na Figura 7, a tendência para os anos seguintes é o aumento da utilização da geração distribuída no país.

Devido a propensão do aumento da geração distribuída, a ANEEL aprovou a abertura de uma audiência pública que tem como objetivo analisar alternativas para o “Sistema de Compensação de Energia” que atualmente é estabelecido pela Normativa 482/2012. Tal normativa estabelece que a energia excedente gerada por micro ou minigeração injetada na rede da distribuidora pode ser revertida em créditos para abater o valor na conta de energia elétrica. No entanto, a alteração das regras atuais pode gerar custos aos consumidores que não possuem instalação de geração própria e é proposto que permaneça as regras até que a quantidade de geração atinja um nível estipulado. (ANEEL, 2019 [B])

Desta forma, observar os impactos que essa nova configuração acarreta ao sistema elétrico é de fundamental importância para manter a segurança e bom funcionamento da rede, não apenas na área técnica, mas também econômica que atinge diretamente o consumidor final.

3.1.2 VANTAGENS DA INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

O principal benefício quando se pensa em geração distribuída é no ponto de vista econômico. Sabendo que uma das maiores despesas dos consumidores é a energia elétrica, a implantação de uma unidade geradora própria diminui consideravelmente ou até mesmo se torna inexistente o valor gasto com energia elétrica. Além disso, com a regulamentação feita pela ANEEL, o excedente gerado pelo consumidor que produz sua própria energia pode ser convertido em créditos a serem utilizados outras localidades cujo titular seja o mesmo. (BRESSAN, 2016; ANEEL, 2019 [A]; NARUTO, 2017)

Além desta vantagem, GD se tornou uma solução para localidades isoladas onde a energia elétrica é de difícil acesso, facilitando a vida de muitas pessoas, principalmente na zona rural. (NARUTO, 2017)

Com relação aos termos técnicos, a geração distribuída também proporcionou muitas melhorias. Por ser localizada próximo ao consumidor final, o gasto com linhas de transmissão é muito menor que o comparado com as grandes centrais geradoras. Além disso, por não ser transportada por longas linhas de transmissão, as perdas de energia são muito menores, aumentando, assim, a eficiência do sistema em geral. (BRESSAN, 2016; NARUTO, 2017)

Outro benefício dentro do aspecto técnico é o alívio ao sistema elétrico, visto que a demanda tem aumentando, cada vez mais necessita-se de maior quantidade de energia, e a GD mantém a demanda sem a necessidade de construção de novos grandes centros de geração, o que beneficia também o meio ambiente, já que evita-se alagamentos, desmatamentos, alteração na fauna e flora, entre muitos outros malefícios.

Uma vantagem interessante é que a GD está indiretamente ligada a implantação das redes inteligente (ou *smart grids*), que trata de uma topologia de rede que permite maior controle e monitoramento do sistema em geral. Essa tecnologia permite maior comodidade e segurança ao consumidor e ao operador do sistema, visto que todo o funcionamento da rede pode ser observado remotamente, tornando a tomada de decisões mais rápida e precisa. (NARUTO, 2017)

Neste tópico nota-se com clareza inúmeras das vantagens de se inserir GD no sistema elétrico. No entanto, assim como a configuração possui muitos benefícios, a sua inserção

desenfreada pode também desenvolver pontos negativos à rede. Estes impactos serão abordados no tópico 3.1.3, a seguir.

3.1.3 DESVANTAGENS DA INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

O Sistema Interligado Nacional (SIN) foi desenvolvido de forma que o fluxo de potência seguisse dos grandes centros de geração, localizada distante do consumidor, transportado por longas linhas do sistema de transmissão, chegando às distribuidoras e finalmente ao consumidor final. Para o bom funcionamento, o sistema conta com inúmeras pessoas responsáveis pelo planejamento e operação do sistema, um processo complexo e que requer bastante estudo.

A geração distribuída causa impactos enormes ao sistema elétrico convencional visto que a rede elétrica não está devidamente preparada para essa inserção. Por exemplo, a qualidade de energia elétrica para o consumidor final pode ser comprometida.

Problemas como cintilação de tensão (causados pelas flutuações de tensão), injeção de harmônicos na rede (devido a presença de elementos de chaveamento), além de possíveis desequilíbrios de tensão e a compensação de energia reativa são abordados em (YAMUJALA et al, 2014) como consequências da inserção da tecnologia de geração distribuída.

Um dos principais problemas causados pela geração distribuída está na necessidade de modificação dos procedimentos de planejamento e controle do sistema, visto que a flexibilização da geração interrompe o controle de muitas localidades dificultando o fornecimento de energia com qualidade, estabilidade e confiabilidade desejadas. Esta modificação acarreta custos com estudos que aumentam proporcionalmente à complexidade do sistema.

Dentre os aspectos técnicos, um dos impactos causados pela inserção de GD próximas à carga é o surgimento de fluxo reverso de potência que impacta a rede da mesma forma quando ocorre uma falta ou pico de carga. Quando fluxos advindos de caminhos distintos se encontram o sistema tende a ficar instável, comprometendo todo o seu funcionamento. Além disso, por tomar caminhos diferentes, os fluxos tendem a danificar diversos equipamentos de proteção e seletividade, devido a incompatibilidade com a rede distribuída. Equipamentos bidirecionais que permitem o fluxo em ambas direções já existem no mercado, no entanto a rede ainda não é adaptada e os custos com a troca destes equipamentos é relativamente alto e a demanda de GD

não está alinhada com o desenvolvimento de tais tecnologias. (BRESSAN, 2016; NARUTO, 2017)

Além dos impactos do fluxo reverso de potência, podem ocorrer problemas de ilhamento causados pelo fornecimento de energia quando o sistema deveria estar desenergizado. Tal problema compromete a segurança de trabalhadores que, por exemplo, estejam trabalhando na manutenção da rede elétrica. (BRESSAN, 2016; NARUTO, 2017)

Outro aspecto relevante, baseado na proteção do sistema elétrico, é o surgimento de correntes desbalanceadas e de curto-circuito. Mesmo tratando de sistemas com potência instalada baixa, a quantidade de sistemas injetando carga na rede tem sido cada vez maior, fato que pode tornar a rede desbalanceada, causando problemas como superaquecimento, maior quantidade de perdas e diminuição da eficiência do sistema. A grande quantidade de geração também influencia no aumento dos níveis de curto-circuito, e, como consequência, prejudica a segurança e confiabilidade do sistema, provocando a atuação indesejada de equipamentos de proteção. (SGUAÇABIA, 2015; NARUTO, 2017)

A geração distribuída tem como suas principais fontes em ascensão a solar fotovoltaica e a eólica. Tais fontes sofrem com a alteração da amplitude relativa, que interfere diretamente nos valores de tensão e frequência da rede. Além disso, para a geração com tais fontes, faz-se necessário a utilização de equipamentos chaveados, como inversor de frequência, que são responsáveis pela grande inserção de harmônicos na rede. Por isso, esses índices devem ser controlados para obter uma melhor qualidade de energia e evitar problemas como aparecimento de tensões ressonantes, perda de vida útil dos equipamentos e demais danos causados pela inadequação de tais índices. (NARUTO, 2017)

Dentro de todos os índices importantes citados, os níveis adequados dos parâmetros são determinados pelos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST), onde as concessionárias e usuários devem atentar aos valores aceitáveis impostos pelo órgão regulador a fim de minimizar os impactos e melhorar a qualidade do sistema.

O sistema com geração distribuída mesmo não necessitando de longas linhas de transmissões, interfere na quantidade de potência reativa injetada no sistema interligado, visto que a rede foi projetada para receber uma determinada quantidade de reativo, e caso esse valor seja excedido pode provocar a sobrecarga das linhas. (NARUTO, 2017)

Ainda com relação a potência reativa injetada no sistema, faz-se necessário salientar que sua alteração constante tem relação direta com a variação dos níveis de tensão, podendo causar danos nos equipamentos e cargas conectadas à rede.

Neste tópico contemplou-se alguns dos impasses para a consolidação da geração distribuída no sistema elétrico de potência. Desta forma, desenvolver uma metodologia que beneficie o planejamento e operação do SEP para a inserção de tais tecnologias é de fundamental importância para manter a quantidade e qualidade da demanda requerida.

3.2 FLUXO DE POTÊNCIA

O objetivo da realização deste cálculo é determinar o estado da rede, onde são obtidos os módulos e ângulos de tensões de todos os barramentos do sistema em análise, conforme sua condição de geração e carga, bem como o fluxo de potência ativa e reativa que flui por eles.

É comum considerar no cálculo de fluxo de potência que os valores das cargas são conhecidos. Assim, em cada barramento existem quatro parâmetros a elas associados, sendo estes as potências ativa e reativa geradas, P e Q respectivamente, a tensão (V) e ângulo (Θ).

Desta forma, se em um barramento existem 4 variáveis desconhecidas e apenas duas equações, classifica-se os barramentos para especificar duas destas variáveis e permanecer com outras duas incógnitas.

Normalmente a classificação pode ser feita para três tipos de barramentos:

- PV - Barramento referente à geração. Neste caso, os valores de potência ativa gerada e tensão são conhecidos.
- PQ - Barramento referente à carga. Neste, caso os valores de potência ativa e reativa geradas são conhecidos, onde normalmente são nulos.
- Swing (Slack) - Barramento de referência. Este barramento possui valores de módulo e ângulo de tensão conhecidos. O barramento de referência normalmente é escolhido como sendo o gerador, dentre vários que podem existir em um sistema, com maior potência nominal e mais centralizado possível.

O processo do fluxo de potência é composto por duas etapas. A primeira etapa realiza o processo iterativo e na segunda os cálculos são realizados de forma direta. Em outras palavras, o processo iterativo permite determinar os valores de tensão em todos os barramentos através

de um método iterativo, enquanto que o método direto utiliza os valores convergidos de tensão para calcular os fluxos de potência entre os elementos do sistema e as potências geradas nos barramentos Swing e PV.

A Figura 8, apresentada a seguir, ilustra o fluxograma de um fluxo de potência convencional para melhor entendimento da simulação computacional.

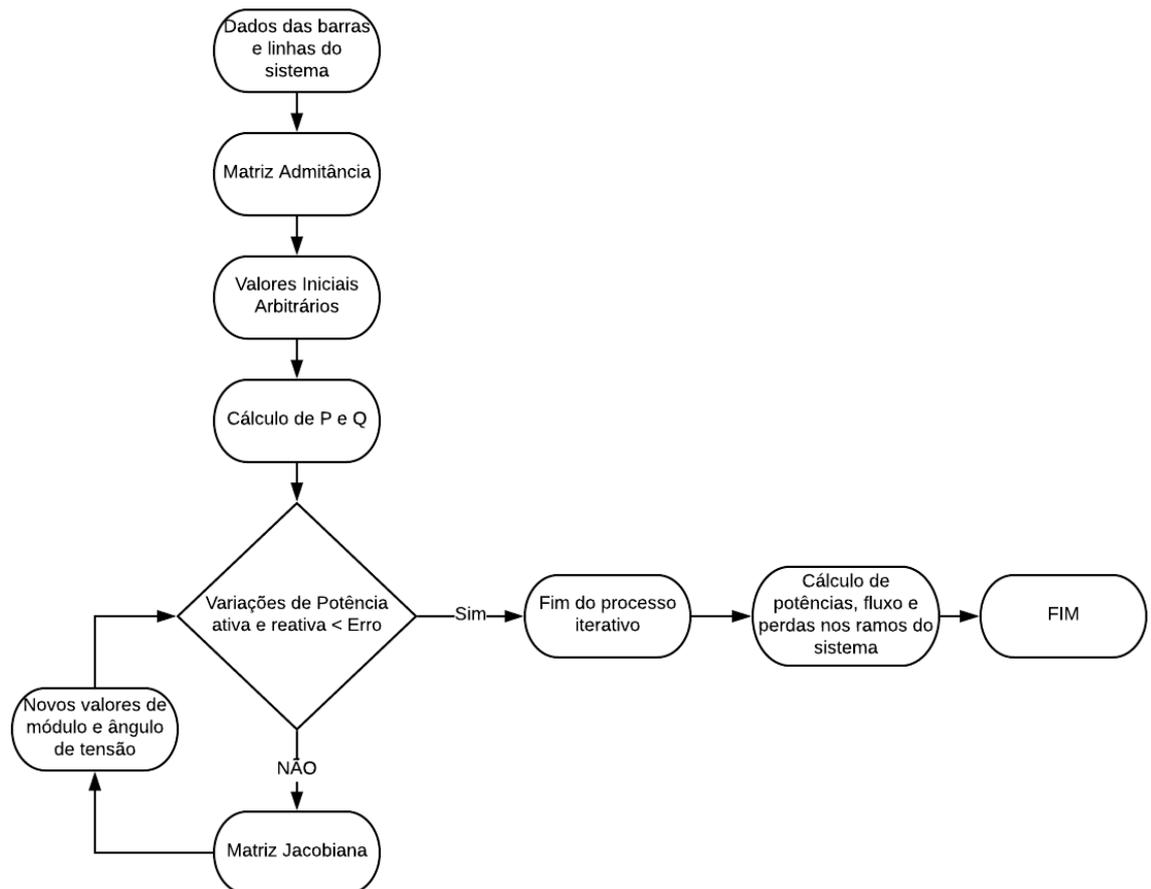


Figura 8: Fluxograma para elaboração de um fluxo de potência convencional.

De acordo com a Figura 8, inicialmente é realizada a aquisição dos dados dos barramentos e linhas do sistema em análise. Posteriormente, é feito o cálculo para determinar a matriz de admitância deste sistema e são escolhidos valores iniciais arbitrários das variáveis que se deseja obter.

Após estas informações é desenvolvido o cálculo das potências ativas e reativas injetados no sistema. Estes valores são comparados ao erro especificado desejado. Caso os valores das variações de potência sejam menores que o erro estipulado, encerra-se o processo

iterativo, do contrário, utiliza-se a matriz Jacobiana para realizar a aproximação da solução a cada iteração realizada.

A cada iteração são obtidos novos valores de tensão e ângulo. Estes, por sua vez, são novamente utilizados no cálculo de erro das potências injetadas até que sua variação seja menor que a tolerância especificada (o que significa convergência do método iterativo). O método direto apenas pode ser calculado após ocorrer convergência do método iterativo.

As aplicações e metodologia utilizada para calcular o fluxo de potência serão apresentadas nas próximas seções.

3.2.1 APLICAÇÕES DO FLUXO DE POTÊNCIA

Segundo CANOSSA (2007), a análise do fluxo de potência tem como principais objetivos e podem ser utilizados nas seguintes situações:

- **Segurança:** a realização do fluxo de carga no SEP é eficaz para prever eventuais violações nos limites de operação do mesmo, com a finalidade de realizar a detecção de problemas futuros que levam a perda de transmissão de energia e/ou perda de estabilidade de partes do sistema elétrico responsáveis por causar o colapso do sistema.
- **Planejamento e Operação:** o fluxo de potência é utilizado como ferramenta fundamental no processo de avaliação de novas configurações do sistema elétrico para se adequar ao aumento da demanda desde que os limites da segurança do sistema elétrico não sejam violados. Visa também a determinação do melhor ponto de operação do sistema elétrico para mitigar as perdas do mesmo.
- **Simulação de Sistemas Elétricos operando sob condições anormais decorrentes da saída de operação de equipamentos como linhas de transmissão, transformadores e unidades geradoras.** A saída de operação desses equipamentos pode se dar pela necessidade de quaisquer tipos manutenções do sistema, ou até mesmo, pelo desligamento automático após causas naturais como descargas atmosféricas.

3.2.2 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

O método de Newton-Raphson é uma técnica largamente utilizada para solucionar sistemas de equações não lineares. Para melhor ilustração e entendimento, pode-se realizar uma análise por meio de um sistema de dois barramentos apresentado pela Figura 9.

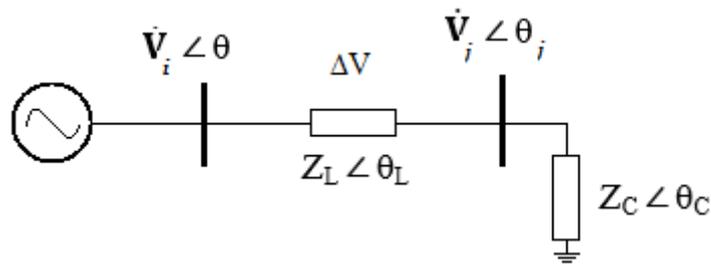


Figura 9: Sistema de dois barramentos.

Fonte: Adaptado de (KUNDUR, 1994)

No sistema de dois barramentos ilustrado pela Figura 9, considera-se V_i como a barra de referência (Slack) e V_j como a barra de carga (PQ) do sistema. No sistema com 2 barramentos, Z_L e Z_C são as impedâncias de linha e carga, respectivamente.

As Equações (1) e (2) representam as potências ativas e reativas injetadas especificadas no barramento j , respectivamente:

$$P_j = V_j \sum_{i=1}^n V_i (G_{ji} \cos \theta_{ji} + B_{ji} \sin \theta_{ji}) \quad (1)$$

$$Q_j = V_j \sum_{i=1}^n V_i (G_{ji} \sin \theta_{ji} - B_{ji} \cos \theta_{ji}) \quad (2)$$

$$\theta_{ji} = \theta_j - \theta_i \quad (3)$$

V e θ são o módulo e ângulo do fasor de tensão da barra, enquanto G e B correspondem às partes reais e imaginárias da matriz de admitância, respectivamente, entre os barramentos i e j . As potências injetadas são obtidas pela subtração da potência gerada pela potência consumida, ou seja:

$$P_{injetada} = P_{gerada} - P_{consumida} \quad (4)$$

$$Q_{injetada} = Q_{gerada} - Q_{consumida} \quad (5)$$

Os erros das potências ativa e reativa injetadas são dados por:

$$\Delta P = P_{injetada} - P_i \quad (6)$$

$$\Delta Q = Q_{injetada} - Q_i \quad (7)$$

ΔP Representa variação de Potência Ativa;

ΔQ Representa a variação de Potência Reativa.

As equações de erros das potências ativa e reativas injetadas devem ser solucionadas pelo método iterativo e a sua relação com as variáveis de estado são indicadas pela Equação (8).

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [j] \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (8)$$

j Representa a matriz Jacobiana;

$\Delta \theta$ Representa a variação do Ângulo da Tensão;

ΔV Representa a variação da Tensão.

As equações de erro de potências ativas e reativas injetadas são comparadas à tolerância estipulada. Se esta for menor, o processo iterativo chega ao fim, do contrário, novas iterações são realizadas até a convergência do método, ou seja, até que o erro seja menor que a tolerância. O Jacobiano deve ser recalculado a cada nova iteração de acordo com as Equações (9) a (11).

$$[j] = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \quad (9)$$

Estas submatrizes são dadas individualmente pelas Equações (7):

$$[H] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_j}{\partial \theta_j} \end{bmatrix} \quad [N] = \begin{bmatrix} V_j \frac{\partial P_j}{v_j} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_j}{\partial \theta_j} \end{bmatrix} \quad [L] = \begin{bmatrix} V_j \frac{\partial Q_j}{v_j} \end{bmatrix}$$

Reescrevendo a matriz Jacobiana apresentada em (9), tem-se:

$$[j] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_j}{\partial \theta_j} & V_j \frac{\partial P_j}{v_j} \\ \frac{\partial Q_j}{\partial \theta_j} & V_j \frac{\partial Q_j}{v_j} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Após a convergência do método iterativo, os fluxos de potência são calculados para todos os ramos do sistema utilizando as seguintes equações:

$$P = \text{Parte Real}(V \cdot I^*) \quad (12)$$

$$Q = \text{Parte Imaginária}(V.I^*) \quad (13)$$

Lembrando que a corrente elétrica entre dois barramentos pode ser calculada da seguinte forma:

$$I_{ij} = \frac{V_i \angle \theta_i - V_j \angle \theta_j}{z_L} + j \times \frac{B_{ij}}{2} \quad (14)$$

3.2.3 CONTROLE DO LIMITE DE INJEÇÕES DE POTÊNCIA

De acordo com MOURA (2016) algumas considerações devem ser atribuídas para se obter o ponto de operação do sistema por meio do fluxo de potência. Ao classificar um barramento como tipo PV, pode acontecer que este ultrapasse o seu limite de geração de potência reativa, e então, neste momento, este barramento não realizará o controle do nível de tensão da sua barra terminal e conseqüentemente, passará a gerar ou consumir o valor limite atingido. Este fato, para a formulação do fluxo de potência, faz com que o barramento PV, cujo limite foi extrapolado, venha se tornar um barramento do tipo PQ.

Em conseqüência, o tamanho da matriz Jacobiana é alterado durante o processo iterativo do fluxo de potência, pois para cada limite violado uma nova equação de erro de potência reativa deve ser resolvida.

3.3.3 ESTABILIDADE DE TENSÃO

Problemas de estabilidade de tensão é um assunto que têm recebido uma atenção especial devido ao aumento da complexidade da rede elétrica devido a inserção de geração distribuída. De maneira mais específica, tais problemas, muitas vezes remetem à associação de sistemas fracos e/ou de linhas de transmissão longas, fatos que podem resultar em grande sobrecarga do sistema.

Pela definição de KUNDUR (1994) a estabilidade de tensão refere-se à habilidade de um sistema de potência em manter os níveis de tensão aceitáveis em todas as barras em condições normais ou até mesmo após este ser submetido a um distúrbio. Quando tal distúrbio aumenta a demanda de carga ou modifica as condições iniciais do sistema, levando-o à um

declínio descontrolado de tensão, o sistema entra em um estado denominado instabilidade de tensão.

A instabilidade pode ocorrer por diversas razões, como a perda da carga, o desligamento de uma linha de transmissão, perda de sincronismo de geradores, má atuação do sistema de proteção e outros diversos fatores.

Um dos principais responsáveis pela instabilidade de tensão é a inabilidade do sistema de potência transmitir potência reativa (KUNDUR, 1994). Em sistemas de alta tensão, cujas linhas de transmissão são altamente indutivas, o sistema tende a diminuir o nível de tensão devido às perdas de potência reativa (ALGHUWAINEM, 2011).

Segundo MOURA (2016) também existe risco de instabilidade por sobretensão, cuja causa está relacionada ao comportamento capacitivo da rede e também ao limite de subexcitação de geradores que previne compensadores síncronos de absorver o excesso de potência reativa. Além disso, outro problema que pode ser resultado de uma incontrolável sobretensão é a sobre-excitação das máquinas síncronas. Quando uma máquina síncrona é sobre-excitada, esta passa a fornecer potência reativa para o sistema e, sem um devido controle desta potência, podem surgir problemas de isolação de equipamentos.

Em SOUZA & QUINTANA (1993) o colapso de tensão é referido como um processo no qual uma sequência de eventos acompanhando a instabilidade de tensão resulta em blackout ou níveis baixos de tensão em parte significativa de um sistema de potência. Uma operação estável em baixo nível de tensão pode persistir após a ocorrência de alteração no tap de um transformador, cujo limite de estímulo é atingido, com ou sem intenção de desligar determinada carga. As demais cargas tendem a ser sensíveis ao nível de tensão, e a demanda conectada na tensão nominal não é determinada.

Para melhor entendimento dos fenômenos de instabilidade e colapso de tensão pode-se citar, como base, estudos de máxima transferência de potência (MTP). A MTP representa os valores máximos dos parâmetros do sistema para seu limite de operação. Neste caso, os valores de referência para o estado crítico são baseados na corrente e tensão da carga.

Quando a demanda de carga aumenta, há inicialmente um aumento na potência, no entanto antes de atingir o ponto máximo, há um decaimento lento na potência. Isso ocorre, porque há um valor máximo de potência ativa que pode ser transmitida através da impedância de um sistema de tensão constante.

A potência máxima a ser transferida pelo sistema é determinada quando a queda de tensão da linha possui o mesmo valor da queda tensão na carga, ou seja, quando ambas impedâncias possuem o mesmo valor, tendo em vista um sistema de dois barramentos. Para sistemas maiores, a MTP pode ser determinada utilizando o traçado da curva PV.

Para uma carga com demanda maior que a potência máxima o controle do limite de potência pela variação de carga seria instável, pois um aumento de admitância da carga reduziria a tensão. Nesta região a tensão pode ou não diminuir progressivamente, dependendo da característica da carga. Se a carga possuir característica de admitância constante, a condição do sistema estabiliza com um nível de tensão menor que o normal, por outro lado, se a carga for suprida por um transformador, a ação da mudança de tap tende a elevar a tensão da carga, proporcionando uma redução no efeito da impedância da linha. Esta baixa tensão na carga continua levando à redução progressiva da tensão. (KUNDUR, 1994)

O termo estabilidade de tensão, de forma geral, envolve problemas de curta, média e longa duração, sendo neste trabalho utilizado exclusivamente para fenômenos de longa duração. A estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência se caracteriza na capacidade do sistema de manter as tensões em todas as barras que o compõe, em faixas de tolerância da tensão nominal, em condições operacionais normais ou mesmo após o sistema ser submetido a uma perturbação. Geralmente, a instabilidade se dá na forma de uma queda progressiva e incontrolada na magnitude da tensão em uma ou mais barras, do sistema elétrico, provocada pela tentativa de restabelecimento da carga. (MALANGE, 2008)

Para a estabilidade de tensão é usual realizar a classificação das seguintes subcategorias apresentadas por KUNDUR *et al.* (2004):

- Estabilidade de tensão para um grande distúrbio é definida como a habilidade do sistema de manter as tensões após um grande distúrbio como um curto-circuito, perda de geração ou contingências no sistema. Esta habilidade é determinada pelo sistema e pelas características das cargas e a iteração dos controles discretos e contínuos e da proteção.
- Estabilidade de tensão para um pequeno distúrbio é definida como a habilidade do sistema de manter/retomar as tensões quando sujeitas a uma pequena perturbação como uma alteração de carga no carregamento do sistema. Esta subcategoria, sofre influências das características da carga, controles contínuos e controles discretos para um dado instante de tempo. Conforme as considerações feitas, as equações do sistema podem ser

linearizadas para análise permitindo o cálculo da valiosa informação de sensibilidade, útil para identificar fatores influenciadores na estabilidade.

De acordo com MOURA (2016), da mesma forma que o estudo de estabilidade angular do rotor, a estabilidade de tensão pode se mostrar de curto ou longo termo, e estes são definidos da seguinte forma:

- Estabilidade de tensão de curto termo relaciona equipamentos cujas componentes de carga são de ação rápida, podendo mencionar como exemplo motores de indução, cargas controladas eletronicamente e conversores de HVDC. Este tipo de estabilidade necessita de uma solução com um sistema de equações diferenciais dentro do especificado.
- Estabilidade de tensão de longo termo, diferente da estabilidade de curto termo, utiliza como base equipamentos de ação lenta como transformadores com LTC's, cargas controladas termostaticamente e limitadores de corrente de geradores. O estudo deste sistema pode levar vários minutos e as simulações são utilizadas para observar o comportamento dinâmico do mesmo. Estabilidade é usualmente determinada como resultado da falha de um equipamento em vez da severidade de um distúrbio inicial. Instabilidade é devido à perda do equilíbrio de longo termo, ponto de operação de regime permanente sendo um distúrbio pequeno instável ou a falta de atração frente a um equilíbrio pós distúrbio estável. Muitas das vezes, utiliza-se a análise estática com finalidade de determinar a margem de estabilidade, além de identificar fatores que influenciam a estabilidade e apresentar uma ampla série de situações para o sistema.

3.4 CURVA PV

A curva PV (Potência ativa *versus* Tensão) retrata o comportamento da tensão de um determinado barramento em função do aumento de sua carga, conforme ilustrado pela Figura 10. A distância entre um ponto operacional atual e a carga máxima é chamada de margem de carga. (MOURA, 2016)

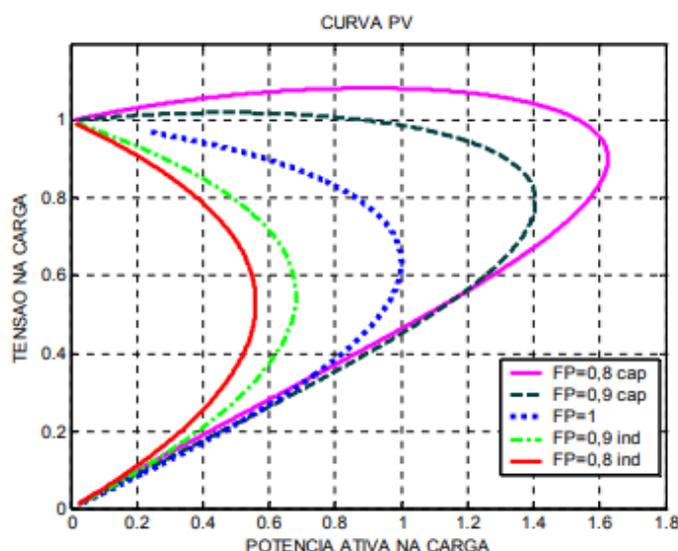


Figura 10: Traçados de curvas PV para diferentes fatores de potência diferente.

Fonte: Figura extraída de (SILVA, 2010)

A partir da Figura 10, pode-se notar que o fator de potência da carga influencia diretamente no comportamento da curva PV. Observa-se que quando a carga indutiva sofre um decréscimo em seu fator de potência, menor também é o valor de potência máxima transferido à carga. Por outro lado, constata-se que a diminuição do fator de potência da carga capacitiva aumenta a margem de carga.

A figura também mostra que a tensão no barramento em questão aumenta para cargas capacitivas, uma vez que cargas desta natureza são capazes de gerar um aumento de tensão no sistema. É importante salientar que este aumento, no contexto de capacidade de hospedagem do sistema, ou seja, a quantidade máxima de geração que resulta em um aumento de tensão igual à margem de carga, deve ser levado em consideração com a finalidade de não se atingir o valor crítico de estabilidade de tensão.

A determinação da curva é feita pelo incremento de carga em todos os barramentos, mantendo o fator de potência constante, e com o monitoramento da tensão e da potência atendida em todos os barramentos. Cada ponto da curva PV é formado por um cálculo de fluxo de potência, onde a cada novo aumento de carga, um problema de fluxo de potência é resolvido e os pontos de equilíbrio obtidos definem o traçado da curva. A partir do levantamento da curva, é possível determinar o máximo carregamento que pode ser inserido em um sistema elétrico de potência.

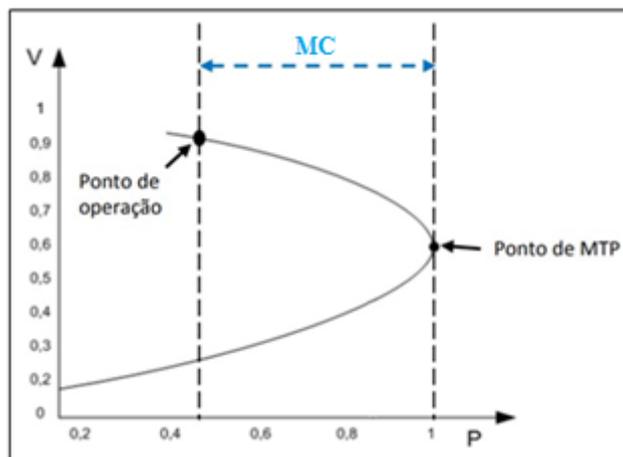


Figura 11: Margem de carga em uma curva PV genérica.

Fonte: Figura adaptada de (VILELA, 2014).

A Figura 11 ilustra uma curva PV genérica, onde se faz destaque para dois pontos. Um deles é o ponto de MTP, onde apresenta o limite de operação do sistema elétrico e o outro é o ponto onde o sistema opera atualmente. A diferença entre o ponto de MTP e o ponto de operação normal do sistema é definido como a margem de carga.

A margem de carga é de papel fundamental para análises de estabilidade de tensão, pois proporciona uma melhor operação e planejamento do SEP, uma vez que permitem avaliar em tempo real o ponto crítico do SEP e possíveis problemas que podem interferir na estabilidade de sistemas com antecedência, respectivamente.

Segundo LEAL (2017), a Margem de Carga pode ser avaliada de duas maneiras, sendo a primeira realizando uma análise para todo o sistema e a segunda somente para determinadas áreas selecionadas. Para a análise geral, a margem é obtida para o sistema como um todo, aumentando-se o carregamento de todos os barramentos de carga e ajustando-se à geração do sistema de modo a atender a sua nova demanda. Em contrapartida, para a análise de áreas selecionadas, são obtidas diferentes margens para cada área do sistema, sendo que aumenta-se o carregamento de seus barramentos e a geração é mantida constante. O sistema é suprido apenas pelos geradores pertencentes à área de estudo. Neste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), optou-se por realizar a análise geral.

3.5 ALGORITMO GENÉTICO

3.5.1 INTRODUÇÃO

Problemas de otimização são cada vez mais encontrados nos dias atuais, independente da área de atuação, buscando por soluções ótimas que atribuam o melhor resultado e que respeitem as restrições impostas por cada problema.

A elaboração de um problema de otimização consiste em uma função objetivo, onde inúmeras variáveis são consideradas e então identificam-se possíveis soluções que aumentem ou diminuam o valor da função objetivo, de maneira a obter a melhor solução possível para o problema analisado. (BENTO & KAGAN, 2008)

Normalmente, os problemas a serem solucionados são complexos e dinâmicos, características que exigem métodos com maior flexibilidade para sua resolução. Por isso, técnicas de otimização utilizando ferramentas de inteligência artificial ou mais precisamente ferramentas de busca heurística tem sido bastante exploradas. O objetivo é obter uma solução boa com um tempo de resposta computacional razoável.

A busca por otimização tem diversos elementos, dentre eles: o espaço de soluções, onde estão todas as soluções possíveis para o problema, e a função de avaliação, que seleciona as melhores soluções dentre as inúmeras possibilidades contidas no espaço de soluções. (LINDEN, 2008)

As técnicas tradicionais têm um único candidato inicialmente que é manipulado ao longo do processo iterativo. Estes processos na maioria das vezes não são algorítmicos e possuem uma simulação computacional complexa. No entanto, são muito utilizados com sucesso em diferentes aplicações. Já as técnicas evolucionárias, utilizam como base uma população contendo diversos candidatos à solução, onde a busca é feita em diferentes locais do espaço. (SOUZA, 2008)

Os Algoritmos Genéticos (AGs) diferem dos métodos tradicionais de busca e otimização em aspectos como ter uma codificação dos parâmetros, por operarem com uma população de diversos candidatos e por utilizarem regras de transição probabilísticas. A utilização deste método é de grande eficiência pois se trata de uma técnica sem muitas limitações como nota-se na utilização dos métodos de busca tradicionais.

Por serem baseados na evolução biológica, os AGs são capazes de convergir para soluções ótimas, ou aproximadamente ótimas em níveis globais, levando em consideração a teoria de seleção natural de Darwin, que diz o indivíduo que melhor se adapta ao meio em que vive possui maior chances de sobrevivência e reprodução. À primeira vista, a técnica pode se apresentar de grande simplicidade em relação à questão biológica, no entanto os algoritmos são complexos e fornecem recursos de busca bastante robustos.

3.5.2 BREVE HISTÓRICO

Discursar sobre Algoritmos Genéticos e não mencionar o início de todo pensamento sobre a evolução não teria nenhum sentido. Considerando isso, deve-se mencionar que tudo se presume da reflexão feita por Charles Darwin em torno de 1850, que por visitar diversos lugares e se deparar com espécies ligeiramente diferentes, embora apresentassem o mesmo parentesco, notou que tais animais se mostravam hábeis a se adaptar em cada sistema de determinada forma.

Tais constatações, acarretaram na teoria das espécies revelada em seu livro, “*On the Origin of Species*” (DARWIN, 1859), e após um longo tempo, estudiosos começaram a refletir sobre tal descoberta e utilizá-las no próximo século.

A partir da década de 40, estudiosos começaram a ver natureza como inspiração para criar o ramo de inteligência computacional. Até o fim da década de 50 quando os problemas eram difíceis para serem resolvidos computacionalmente, houve a necessidade de implementar sistemas genéricos para obter tais soluções.

A partir daí diversas pesquisas que tratavam de sistemas evolucionários foram publicadas levantando a hipótese de que a evolução poderia ser usada como uma ferramenta de otimização. Grande parte dos sistemas tomavam como partida as premissas estabelecidas pela teoria da seleção natural em um ambiente que sofre alterações.

Na década de 60, John Holland e outros pesquisadores desenvolveram sistemas também baseados na seleção natural em conjunto com a genética (HOLLAND, 1975). O objetivo não era aplicar os conhecimentos de técnicas evolutivas para solucionar problemas típicos, mas sim entender melhor o processo de adaptação da natureza e voltar sua aplicação em sistemas computacionais. Após os estudos realizados, publicou um livro “*Adaptation in Natural and Artificial Systems*”, onde começou a alavancar estudos destinados a este tipo de otimização.

Futuramente, com a publicação do livro “Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning” de (GOLDBERG, 1989), o desenvolvimento de sistemas para otimização se tornou significativo e passou a ter lugar considerável na teoria dos AGs. Desde então, utiliza-se a técnica de busca paralela e estruturada que é feita de forma aleatória, em busca de pontos altos ou baixos da função desejada. Mesmo partindo de uma busca aleatória, há a inserção das características do problema antecipadamente, que norteia o rumo das soluções durante o processo iterativo.

3.5.3 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS ALGORITMOS GENÉTICOS

Para a melhor compreensão da formulação do algoritmo genético e entendimento de suas características, alguns conceitos básicos são necessários. Tais conceitos podem ser facilmente explorados observando o funcionamento básico do algoritmo apresentado pelo fluxograma da Figura 12.

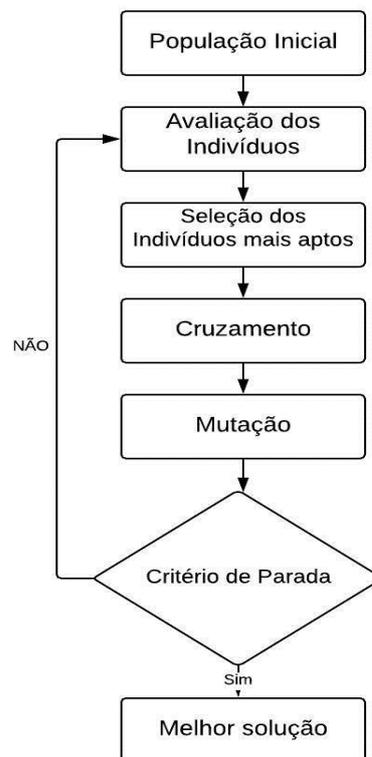


Figura 12: Fluxograma de um algoritmo genético básico.

Para a formulação do algoritmo genético inicialmente é gerada uma população que é formada por indivíduos aleatórios, que por sua vez, são candidatos à possíveis solução do problema.

Os candidatos gerados passam por uma avaliação onde recebem uma “nota” de acordo com sua habilidade de adaptação ao ambiente em questão. Quanto mais se adaptar maior a nota e vice-versa.

Em seguida, os indivíduos com maiores notas tendem a serem selecionados e aqueles que apresentarem menores notas a serem descartados, passando então pela etapa de seleção.

Os membros selecionados são submetidos à uma recombinação, onde realiza-se o cruzamento (crossover) entre dois indivíduos com a finalidade de obter outros dois novos e por fim pode sofrer modificações por meio da mutação em que a estrutura de um indivíduo selecionado é alterada aleatoriamente para se obter novas opções. (SOUZA, 2008)

Este processo se repete até que uma solução satisfatória seja encontrada.

O mesmo processo pode ser observado na Figura 13 de forma mais explicativa.

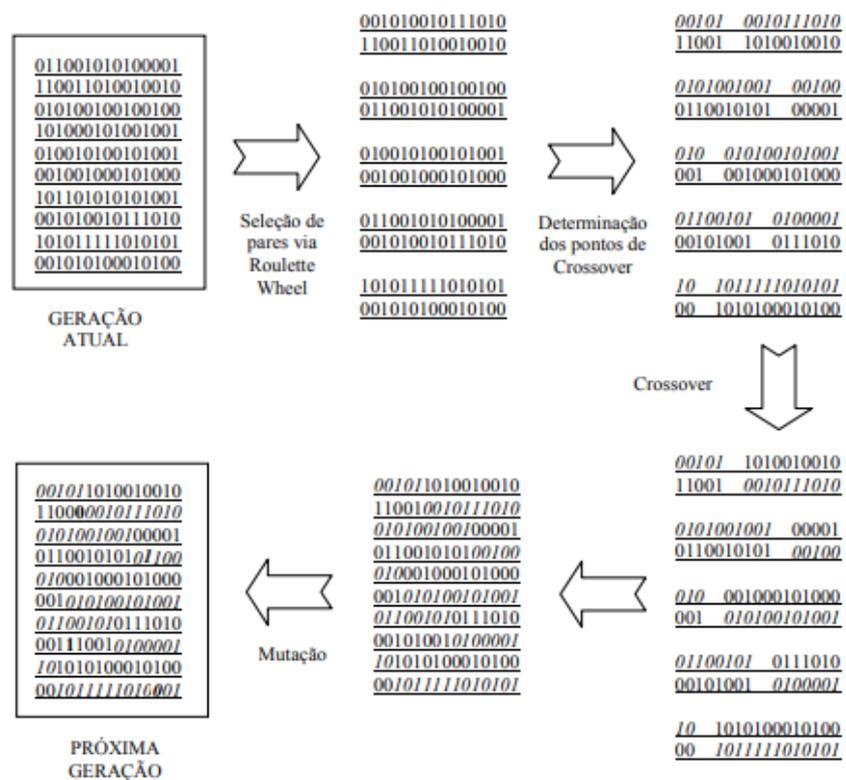


Figura 13: Processo simplificado de um algoritmo genético.

Fonte: Extraído de ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/ia707_01/topico6_01.pdf

3.5.4 OPERADORES GENÉTICOS

Os algoritmos genéticos trabalham com seus indivíduos de modo que estes sejam submetidos à operadores genéticos como seleção de indivíduos, cruzamento (ou crossover) e mutação. Inicialmente os operadores utilizam um tipo de avaliação das espécies e posteriormente gera um processo de evolução natural, até que se encontre um indivíduo que satisfaça a característica imposta pelo problema, podendo ou não ser a solução ótima desejada. (LINDEN, 2008)

Inicialmente, é necessário salientar que a representação dos cromossomos a serem utilizados no espaço de busca devem ser compatíveis à leitura do computador. Uma das formas mais empregadas é a representação por uma sequência binária por se tratar de uma representação de fácil domínio. No entanto, escolher a melhor forma de representar os indivíduos deve ter como base o problema a ser solucionado, já que cada problema possui características únicas. Outros tipos podem ser encontrados em HOLLAND (1975).

3.5.4.1 INICIALIZAÇÃO

O operador de inicialização é aquele que cria uma população inicial para o processo evolutivo. Normalmente este processo acontece de forma aleatória e os cromossomos são gerados e classificados em espécies, ou o processo pode ocorrer de forma determinística, em que os cromossomos são gerados de acordo com uma função heurística. A geração de cromossomos aleatória permite uma maior diversidade genética e, portanto, percorre uma maior área dentro do espaço de busca, fato que proporciona melhores soluções para o problema analisado. (ROSA & LUZ, 2009)

3.5.4.2 FUNÇÃO DE AVALIAÇÃO

A função de avaliação, ou também chamada de aptidão, é o que liga o AG e o problema a ser solucionado. É nela onde deve-se inserir todas as características e imposições a que o problema necessita. A função de aptidão é específica para cada problema a ser solucionado. (LINDEN, 2008)

Assim como no mundo real, os indivíduos que melhores se adaptam ao meio em que vivem possuem maiores chances de sobrevivência e reprodução. Ao longo do tempo, modificações podem acontecer neste meio e, portanto, tais seres necessitam se adaptar novamente. Quando um indivíduo não se adapta ao meio pode levar a extinção de sua espécie. (ROSA & LUZ, 2009)

O mesmo ocorre para os AGs. A otimização deve levar em conta quão boa pode ser uma solução e para isso agrega-se uma determinada “nota” para cada possível solução. Quanto maior a nota do indivíduo, maior a chance de ser selecionado e este então se torna uma possível solução ótima para o problema. Os indivíduos que menos se destacarem, ou seja, obterem uma nota menor, tendem a serem extintos, ou descartados do processo evolutivo.

3.5.4.3 SELEÇÃO

O operador de seleção tem como base o processo de seleção natural, levando em consideração que os indivíduos cujas notas, estabelecidas pela função de avaliação, são melhores tem maior probabilidade de serem selecionados e os de notas menores, possuem menos chances de seleção.

A seleção não é feita apenas escolhendo os indivíduos com maior aptidão devido às características presentes nos menos aptos também serem relevantes para solucionar o problema. Tais informações podem ser importantes após um cruzamento e então proporcionar uma solução satisfatória do problema. (ROSA & LUZ, 2009; LINDEN, 2008)

Muitos são os métodos disponíveis para realizar a seleção dos indivíduos, entre estes estão:

- **Roleta:** A seleção dos cromossomos é proporcional à sua nota de avaliação. Os cromossomos são representados em uma roleta, e o espaço que ocupam é equivalente à nota obtida. Assim, aqueles que obterem maior nota possuem, conseqüentemente, maior espaço na roleta, e os que receberam uma nota mais baixa são representados em frações menores da roleta. A seleção pela roleta é feita até que se alcance a quantidade de pares necessários para a execução dos processos de cruzamento e mutação.

- Torneio: uma quantidade de n cromossomos é escolhida aleatoriamente da população atual. A partir disso, o cromossomo com maior nota é escolhido e selecionado para uma população intermediária. Após tal seleção, os cromossomos não selecionados são retornados para a população inicial e novamente o processo se repete até que a população intermediária seja completada.
- Dizimação: Coloca os cromossomos em ordem de aptidão (nota) e após isso exclui uma determinada quantidade de cromossomos com menores notas. Dentre os cromossomos restantes, os pais são escolhidos aleatoriamente. Trata-se de uma técnica desvantajosa já que muitas propriedades importantes são perdidas por excluir-se cromossomos de baixa aptidão e então ter como consequência uma convergência prematura do algoritmo.

3.5.4.4 CRUZAMENTO

O objetivo do processo de cruzamento é trocar informações entre pares de cromossomos com a finalidade de propagar características boas e gerar novos indivíduos.

Algumas das maneiras de se realizar a troca de segmentos em AGs são:

- Ponto único: Neste método é determinado um ponto de corte aleatório em cada cromossomo, e então, a partir deste ponto o material genético dos pais são invertidos originando outros dois indivíduos para a próxima geração. Desta forma, os filhos são formados por um conjunto de características exigentes em ambos os pais.
- Ponto duplo: Assim como no método anterior, só que agora com dois pontos de corte, o método de ponto duplo realiza o cruzamento das características dos pais que passarão para os filhos, no entanto, neste caso, isso ocorre de maneira intercalada.
- Pontos aleatórios: Utilizando cromossomos binários, este método realiza o cruzamento a partir do local onde os alelos possuem valor 1 para adquirir material de um dos pais, e pega o valor 0 como material de outro pai. Pode-se inverter o processo e iniciar um novo processo de cruzamento. (ROSA & LUZ, 2009)

3.5.4.5 MUTAÇÃO

O objetivo deste operador é aumentar a diversidade genética entre os indivíduos visto que ao longo da evolução os filhos tendem a obter as características dos pais. A mutação é realizada de forma aleatória e é executada após a etapa de cruzamento. Sua utilização proporciona o aparecimento de propriedades inexistentes ou mesmo existentes em pouca quantidade. No entanto, devemos salientar que a taxa de mutação não deve ser muito elevada por causar diminuição na semelhança com os pais e, portanto, perder características necessárias para a solução desejada.

As técnicas mais utilizadas para realizar a mutação são:

- Mutação aleatória: dentro de uma quantidade de valores, um é sorteado para substituir o que sofrerá a mutação;
- Mutação por troca: uma quantidade de n pares de genes são sorteados e trocam de valores entre si;

3.5.4.6 ATUALIZAÇÃO

A atualização é encarregada de substituir a população antiga por uma nova população que surge após o cruzamento dos indivíduos. Essa ação pode ser denominada por elitismo, e normalmente a quantidade selecionada é muito pequena pois, há o risco de convergência precipitada do AG. Também pode acontecer de boas soluções serem descartadas.

3.5.4.7 FINALIZAÇÃO

O operador de finalização equivale à convergência do algoritmo. Ele é o responsável por determinar a conclusão, ou não, da execução do AG, baseado nas condições pré-estabelecidas pelo critério de parada. Tal critério pode levar em consideração o número de gerações ou então a proximidade da solução satisfatória.

3.5.5 PARÂMETROS GENÉTICOS

Os parâmetros que mais influenciam no desempenho dos AGs são:

- Tamanho da população. Deve-se buscar o equilíbrio no momento de determinar o tamanho da população, pois uma população pequena disponibiliza uma quantidade pequena de soluções dentro do espaço de busca, fato que diminui o desempenho do algoritmo ou que tende a obter uma convergência prematura para uma solução local. Já uma população muito grande pode demandar muito tempo de processamento, inviabilizando o esforço computacional necessário para obter a solução ótima.
- Taxa de cruzamento. A alta taxa de cruzamento proporciona uma modificação grande nos indivíduos, o que pode tornar-se indesejável caso tais modificações afastem as soluções de indivíduos com maior aptidão. Além disso pode reduzir a variedade genética dos indivíduos e obter soluções semelhantes. A baixa taxa interfere quanto a velocidade de processamento, que pode tornar o processo lento demais para obter a solução satisfatória.
- Taxa de mutação. A taxa muito alta pode levar o processo a se tornar aleatório causando dificuldades do algoritmo para convergir para a solução ótima.
- Intervalo de geração. Determina a quantidade da população que será substituída na próxima geração.
- Número de gerações. O ideal é obter o equilíbrio assim como no tamanho da população. Uma vez que o número de gerações seja muito baixo o desempenho do algoritmo é comprometido em contrapartida se o número de gerações é elevado compromete no tempo de processamento para obter a solução.

3.5.6 APLICAÇÕES

A aplicabilidade de Algoritmos Genéticos é praticamente infinita, pois é capaz de resolver problemas de alta complexidade onde outros métodos de busca possuem dificuldades. Toda vez que houver um problema, cuja necessidade é uma otimização (até mesmo em resoluções de equações), um AG pode ser considerado.

Problemas como otimização combinatória e estimativas de parâmetros podem ser citados como exemplos da maioria das finalidades de se empregar algoritmos genéticos.

Como ferramenta de busca AGs se mostram extremamente eficientes, pois encontram soluções ótimas, ou quase ótimas, na maioria das vezes. Este fato se deve principalmente por serem fáceis de se implementar e realizar alterações.

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme visto no presente capítulo, a geração distribuída se mostrou uma tendência para a geração de energia, não apenas no Brasil, mas em todo o mundo. Inúmeras são as vantagens de se aderir a nova tecnologia, como a diminuição de perdas na transmissão, o abastecimento de energia em locais remotos, menores danos ambientais mínimos durante a instalação, rápida instalação, menor capital investido, entre outras. Em contrapartida, muitas são as adversidades que podem atingir o sistema elétrico caso a inserção da geração distribuída seja descontrolada resultando em colapso da rede.

Desta forma, buscar alternativas de se prever futuras complicações ao sistema elétrico de potência, estimar o limite de geração distribuída (capacidade de hospedagem) que pode ser injetada à rede, se tornou um estudo de suma importância.

Uma maneira eficaz de se estimar este limite é utilizando técnicas de otimização por meio de simulação computacional, como é o caso dessa dissertação. O capítulo subsequente é responsável por apresentar a metodologia utilizada para se determinar a capacidade de hospedagem de geração distribuída por meio do algoritmo genético.

CAPÍTULO 4: METODOLOGIA

4.1 INTRODUÇÃO

A metodologia utilizada neste trabalho é composta pelos seguintes passos para cada sistema analisado:

1. Cálculo de fluxo de potência para a carga nominal.
2. Aumento de carga mantendo-se o fator de potência constante.
3. Repetição dos passos 1 e 2 até que ocorra divergência do cálculo de fluxo de potência. O ponto anterior a convergência é o ponto de máximo carregamento. Este processo permite calcular as curvas PV's dos sistemas analisados.
4. Delimitação da área crítica de cada sistema pelo método do Vetor Tangente.
5. Cálculo dos valores de geração distribuída a serem inseridos dentro da área crítica por meio do algoritmo genético.

A metodologia será aplicada a dois sistemas testes do IEEE e um sistema real brasileiro.

Nas próximas seções está descrito em detalhe cada passo do fluxograma ilustrado na Figura 14.

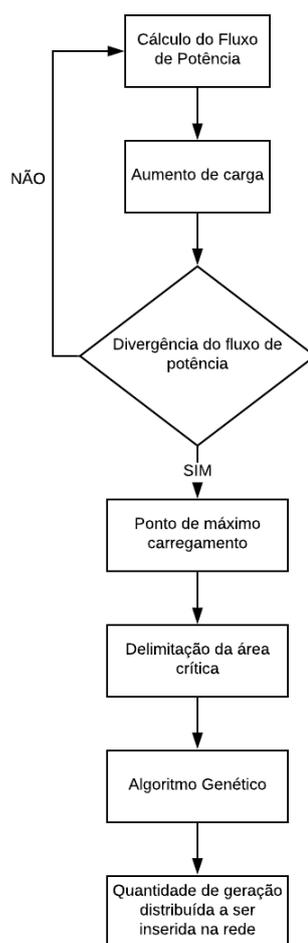


Figura 14: Fluxograma da metodologia proposta.

4.2 FLUXO DE POTÊNCIA

Para a elaboração do código, utiliza-se o *software* MATLAB R2014a. Os códigos serão avaliados em sistemas testes do IEEE e em um sistema real brasileiro, validando o funcionamento do programa desenvolvido.

De início, faz-se necessário total conhecimento dos dados dos barramentos e das linhas do sistema a ser analisado. Tais dados são dispostos em duas matrizes, sendo a primeira a matriz A, composta pelas informações dos barramentos, e a segunda a matriz C, composta pelos dados das linhas. Cada coluna destas matrizes corresponde a uma característica específica do sistema.

A matriz A possui treze colunas dadas por:

- Coluna 1: Tipo da barra (Slack, PQ ou PV)

- Coluna 2: Tensão na barra
- Coluna 3: Ângulo da tensão na barra
- Coluna 4: Potência Ativa gerada na barra
- Coluna 5: Potência Ativa consumida na barra
- Coluna 6: Potência Reativa consumida na barra
- Coluna 7: Potência Reativa gerada na barra
- Coluna 8: Potência Reativa máxima gerada
- Coluna 9: Potência Reativa mínima gerada
- Coluna 10: Susceptância shunt instalada
- Coluna 11: Área pertencente a barra
- Coluna 12: Barra de tensão controlada
- Coluna 13: Se diferente de zero, indica número da barra interna do MIT associada a esta barra

A matriz C é dada por sete colunas que correspondem à:

- Coluna 1: Barra de origem
- Coluna 2: Barra de término
- Coluna 3: Resistência em pu
- Coluna 4: Reatância em pu
- Coluna 5: Susceptância shunt total da linha
- Coluna 6: Presença ou não de Tap (se houver, valor igual a 1)
- Coluna 7: Se tiver Tap, utilizar o valor do Tap

A partir desses dados, é possível calcular a matriz de admitância do sistema. As matrizes A e C dos sistemas testes do IEEE utilizados nesta monografia são apresentadas no Anexo A.

Em seguida, são arbitrados valores iniciais para o módulo das tensões e ângulos das barras do sistema.

Posteriormente, calculam-se os valores de potência ativa e reativa injetadas e o módulo e fase da tensão em cada barramento do sistema, iniciando assim o processo iterativo. A cada nova iteração novos valores para essas variáveis são obtidos, até que a convergência seja atingida. Para tal, as variações de potências ativas e reativas devem ser menores que a tolerância pré-determinada.

Para atingir a convergência do processo, utiliza-se a matriz Jacobiana, utilizada como tangente para aproximar o valor da solução. Este processo é realizado para a determinação do fluxo de potência pelo método convencional de Newton-Raphson.

4.3 CURVA PV

Logo após a elaboração do fluxo de potência, um algoritmo é utilizado para se obter as curvas PV's dos sistemas teste do IEEE e do sistema real brasileiro. Para a determinação de tais curvas, uma sucessão de soluções do fluxo de potência é realizada.

Há um incremento de carga a cada nova convergência do cálculo de fluxo de potência, obtendo, portanto, a tensão em cada um dos barramentos do sistema. Assim, cada valor obtido torna-se um ponto da curva. O ponto de máximo carregamento é determinado quando não é possível obter maior incremento de carga no sistema, apresentando, desta forma, o limite suportado por este.

O fator de carga estabelecido realiza um acréscimo de 0.01 pu a cada iteração, ou seja, a carga no sistema tem um aumento de 1% em relação ao arquivo base.

A curva PV será utilizada como função objetivo do algoritmo genético de forma a determinar a solução ótima para o incremento de geração distribuída em sistema analisado.

4.4 TÉCNICA DO VETOR TANGENTE

Para realizar a análise de quais os lugares mais apropriados para inserir geração distribuída no sistema, de forma a ampliar a margem de máximo carregamento indicada pela curva PV, será utilizado a técnica do vetor tangente (SOUZA & QUINTANA, 1993).

A Equação (15) demonstra as variáveis envolvidas no cálculo do Vetor Tangente.

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix}$ representa o vetor da relação entre a variação das variáveis de estado do sistema em função da variação do parâmetro. As variáveis de estados podem ser ângulo ou tensão dos

barramentos, enquanto que o parâmetro é o aumento de carga utilizado para confeccionar a curva PV;

J Representa a matriz jacobiana (ponto de operação nominal);

P_0 Representa a potência ativa injetada inicial (ponto de operação nominal);

Q_0 Representa a potência reativa injetada inicial (ponto de operação nominal).

Na Equação 15 nota-se que são utilizados dados de potências ativas e reativas injetadas iniciais e a matriz Jacobiana para o ponto de operação nominal. Isso possibilita uma precoce identificação do barramento crítico. Este barramento está associado ao maior valor em módulo obtido pela Equação 15 quando são considerados apenas como variáveis de estado as tensões terminais dos barramentos.

Uma vez determinado o barramento crítico, os barramentos que apresentam conexões com este barramento formam a primeira vizinhança da área crítica. De maneira análoga, os barramentos conectados a primeira vizinhança da área crítica compõem a segunda vizinhança da área crítica. A região formada pela primeira e segunda vizinhança receberá os valores de geração distribuída calculados pelo algoritmo genético e será denominada nesta monografia como área crítica.

4.5 ALGORÍTMO GENÉTICO

Inicialmente, é necessário definir a função objetivo a ser utilizada para a otimização do algoritmo genético. Nesta monografia, a função é a Curva PV, mencionada no tópico anterior.

A seguir é necessário a geração de uma população inicial de cromossomos, ou indivíduos, que representam possíveis soluções para o problema contidas dentro de um espaço determinado pelo usuário. A primeira seleção é realizada de forma aleatória utilizando o método da “ roleta viciada”, onde os indivíduos mais aptos possuem maior probabilidade de serem selecionados e os menos aptos, conseqüentemente, possuem menor probabilidade de seleção. Este fato interfere diretamente na qualidade da solução obtida.

Pode-se notar que, a princípio, o programa procura as melhores soluções aleatoriamente, no entanto, ao longo do processo tende a encontrar a melhor solução de forma natural por meio do cruzamento e mutação.

Neste problema, os cromossomos são formados pelos barramentos dos sistemas que compõem a área crítica. Cada barramento (gene) receberá potências ativas e reativas injetadas, caracterizadas como geração distribuída. A população de cada geração é equivalente ao número de barramentos do sistema analisado. Para sistemas que possuem número ímpar de barramentos, a população receberá mais um indivíduo, pois o cruzamento entre dois indivíduos resultará em dois novos indivíduos na próxima geração.

Na fase de cruzamento é levada em conta a possibilidade de modificação nas características fundamentais dos membros, chamada de mutação. A probabilidade de ocorrer a mutação considerada é de 1%. Para implementá-la é sorteado um número entre 0 e 99. Caso o número zero for o selecionado, o indivíduo sofrerá mutação em um de seus genes, do contrário, o indivíduo permanece sem nenhuma alteração.

O processo é repetido até completar o número de gerações desejadas ou se obter uma solução satisfatória. No algoritmo implementado, optou-se por realizar 50 gerações. Ao fim do processo, será determinada a melhor solução para a margem de carregamento do sistema escolhido e será possível obter um comparativo entre os resultados com e sem a utilização do algoritmo genético para tal finalidade.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve como objetivo apresentar os critérios usados na formulação da curva PV e do algoritmo genético, cujo objetivo é determinar se é possível aumentar a margem de carregamento dos sistemas analisados.

O capítulo seguinte mostra a análise dos testes e os resultados da metodologia proposta aplicados nos sistemas de 14 e 30 barramentos do IEEE, além do sistema real brasileiro, Sul Sudeste, de 65 barramentos. Os dados dos sistemas estão em anexo. Os valores pertinentes aos sistemas, como potência e tensão, foram trabalhados em valores por unidade (pu), onde a tensão base e a potência base equivalem, respectivamente, a tensão nominal do ponto de operação e ao valor de 100 MVA.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo é destinado à apresentação dos resultados obtidos com base na metodologia exposta no capítulo anterior. Para as simulações, utilizou-se o *software* MATLAB R2014a, cuja licença é obtida pelo IFMG – Campus Formiga. As simulações realizadas contemplam os sistemas testes do IEEE, com 14 e 30 barramentos, e o sistema real brasileiro Sul Sudeste de 65 barramentos. Inicialmente são apresentados os resultados obtidos pela simulação do fluxo de potência e da curva PV para cada sistema, comparando-os com os já existentes na literatura. Em seguida, é elaborado um algoritmo genético genérico como forma de se explorar melhor seu funcionamento, bem como as etapas necessárias para sua confecção. Finalmente, são expostos os resultados da implementação do algoritmo genético para solucionar o problema da capacidade de hospedagem de geração distribuída, por meio da função objetivo que é a Curva PV obtida. Ao fim deste tópico será possível obter a margem de carregamento dos sistemas e sua possível ampliação utilizando o algoritmo genético.

5.2 FLUXO DE POTÊNCIA E CURVA PV

Quando o fluxo de potência é calculado diversos parâmetros podem ser obtidos como forma de observar o estado geral do sistema. Dentre tais parâmetros os mais importantes são as tensões em cada barramento, bem como potências geradas e injetadas em cada um deles. As próximas seções deste capítulo apresentarão os resultados obtidos com a simulação do cálculo do fluxo de potência simulado em cada sistema teste analisado.

5.2.1 SISTEMA DE 14 BARRAMENTOS

As Tabelas 1 e 2 indicam os resultados obtidos através do cálculo do fluxo de potência simulado para o sistema de 14 barramentos do IEEE. Nelas constam parâmetros como tensão, potências injetadas e potências geradas em cada barramento do sistema, respectivamente.

Tabela 1: Valores de tensão simulados por meio do cálculo do fluxo de potência para o sistema de 14 barramentos do IEEE.

Número do barramento	Tipo do barramento	Tensão [pu]	Ângulo (°)
1	SWING	1.0600	0.0000
2	PV	1.0450	-1.3509
3	PV	1.0100	-9.4963
4	PQ	1.0144	-7.3878
5	PQ	1.0203	-6.1695
6	PQ	1.0286	-12.1683
7	PQ	1.0209	-10.7039
8	PQ	1.0607	-10.7039
9	PQ	1.0008	-12.4713
10	PQ	0.9979	-12.7256
11	PQ	1.0094	-12.5795
12	PQ	1.0121	-13.0723
13	PQ	1.0062	-13.1139
14	PQ	0.9842	-13.8545

Tabela 2: Valores de potência (injetada e gerada) simulados por meio do cálculo do fluxo de potência para o sistema de 14 barramentos do IEEE..

Número do barramento	Tipo do barramento	Potência ativa injetada [pu]	Potência reativa injetada [pu]	Potência ativa gerada [pu]	Potência reativa gerada [pu]
1	SWING	1.0221	0.1958	1.0221	0.1958
2	PV	1.4430	-0.0526	1.6600	0.0744
3	PV	-0.9420	0.1023	0.0000	0.2923
4	PQ	-0.4780	0.0390	0.0000	0.0000
5	PQ	-0.0760	-0.0160	0.0000	0.0000
6	PQ	-0.1120	0.2400	0.0000	0.3150
7	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	PQ	0.0000	0.2400	0.0000	0.2400
9	PQ	-0.2950	-0.1660	0.0000	0.0000
10	PQ	-0.0900	-0.0580	0.0000	0.0000
11	PQ	-0.0350	-0.0180	0.0000	0.0000
12	PQ	-0.0610	-0.0160	0.0000	0.0000
13	PQ	-0.1350	-0.0580	0.0000	0.0000
14	PQ	-0.1490	-0.0500	0.0000	0.0000

5.2.2 SISTEMA DE 30 BARRAMENTOS

Assim como mostrado no sistema de 14 barramentos, as Tabelas 3 e 4 indicam os resultados obtidos por meio da simulação do cálculo do fluxo de potência para o sistema de 30 barramentos do IEEE.

Tabela 3: Valores de tensão simulados por meio do cálculo do fluxo de potência para o sistema de 30 barramentos do IEEE.

Número do barramento	Tipo do barramento	Tensão [pu]	Ângulo (°)
1	SWING	1.0600	0.0000
2	PV	1.0430	-5.5099
3	PQ	1.0199	-7.9860
4	PQ	1.0114	-9.6494
5	PV	1.0100	-14.4312
6	PQ	1.0070	-11.3567
7	PQ	1.0000	-13.1391
8	PV	1.0100	-12.1666
9	PQ	1.0079	-14.6586
10	PQ	0.9848	-16.4435
11	PQ	1.0552	-14.6586
12	PQ	1.0040	-15.9158
13	PQ	1.0364	-15.9158
14	PQ	0.9871	-16.8689
15	PQ	0.9814	-16.9055
16	PQ	0.9883	-16.4401
17	PQ	0.9802	-16.6740
18	PQ	0.9697	-17.5226
19	PQ	0.9661	-17.6750
20	PQ	0.9699	-17.4305
21	PQ	0.9713	-16.9250
22	PQ	0.9717	-16.9030
23	PQ	0.9676	-17.2107
24	PQ	0.9582	-17.2295
25	PQ	0.9627	-16.8726
26	PQ	0.9440	-17.3422
27	PQ	0.9746	-16.3546
28	PQ	1.0023	-11.9849
29	PQ	0.9537	-17.7133
30	PQ	0.9415	-18.6918

Tabela 4: Valores de potência (injetada e gerada) simulados por meio do cálculo do fluxo de potência para o sistema de 30 barramentos do IEEE.

Número do barramento	Tipo do barramento	Potência ativa injetada[pu]	Potência reativa injetada[pu]	Potência ativa gerada [pu]	Potência reativa gerada [pu]
1	SWING	2.6131	-0.1357	2.6131	-0.1357
2	PV	0.1830	0.4464	0.4000	0.5734
3	PQ	-0.0240	-0.0120	0.0000	0.0000
4	PQ	-0.0760	-0.0160	0.0000	0.0000
5	PV	-0.9420	0.2161	0.0000	0.4061
6	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	PQ	-0.2280	-0.1090	0.0000	0.0000
8	PV	-0.3000	0.1864	0.0000	0.4864
9	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	PQ	-0.0580	-0.0200	0.0000	0.0000
11	PQ	0.0000	0.2400	0.0000	0.2400
12	PQ	-0.1120	-0.0750	0.0000	0.0000
13	PQ	0.0000	0.2400	0.0000	0.0000
14	PQ	-0.0620	-0.0160	0.0000	0.0000
15	PQ	-0.0820	-0.0250	0.0000	0.0000
16	PQ	-0.0350	-0.0180	0.0000	0.0000
17	PQ	-0.0900	-0.0580	0.0000	0.0000
18	PQ	-0.0320	-0.0090	0.0000	0.0000
19	PQ	-0.0950	-0.0340	0.0000	0.0000
20	PQ	-0.0220	-0.0070	0.0000	0.0000
21	PQ	-0.1750	-0.1120	0.0000	0.0000
22	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23	PQ	-0.0320	-0.0160	0.0000	0.0000
24	PQ	-0.0870	-0.0670	0.0000	0.0000
25	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26	PQ	-0.0350	-0.0230	0.0000	0.0000
27	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
28	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
29	PQ	-0.0240	-0.0090	0.0000	0.0000
30	PQ	-0.1060	-0.0190	0.0000	0.0000

5.2.3 SISTEMA SUL SUDESTE

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos pela confecção do fluxo de potência simulado para o sistema Sul Sudeste de 65 barramentos. As Tabelas 5 e 6, respectivamente, os valores de tensão, potência injeta e gerada nos barramentos.

Tabela 5: Valores de tensão simulados por meio do cálculo do fluxo de potência para o sistema de barramento sul sudeste.

Número do barramento	Tipo do barramento	Tensão [pu]	Ângulo (°)
1	PV	1.0000	2.8172
2	PV	1.0100	-2.0443
3	PV	1.0000	-28.4521
4	PQ	1.0431	-8.2430
5	PQ	1.0602	-19.8356
6	PQ	1.0571	-30.1625
7	PQ	1.0520	-29.6112
8	PQ	1.0410	-39.6442
9	PQ	1.0493	-31.4660
10	PQ	1.0488	-28.4521
11	PQ	1.0083	-35.3696
12	PQ	1.0349	-1.6165
13	PQ	1.0373	-9.1791
14	PQ	1.0302	-3.7154
15	PQ	1.0073	-9.3937
16	PQ	0.9902	-12.1178
17	PV	1.0000	7.6149
18	PV	1.0200	7.5950
19	PV	1.0100	7.5858
20	PV	1.0100	0.5955
21	PQ	1.0331	2.3406
22	PQ	1.0519	2.9040
23	PQ	1.0440	1.6982
24	PQ	1.0395	3.8840
25	PQ	1.0418	-0.9402
26	PV	1.0200	-2.6105
27	PQ	1.0216	-3.0613
28	PQ	0.9953	-8.6711
29	SWING	1.0300	0.0000
30	PV	1.0300	14.0936
31	PV	1.0300	6.7253
32	PQ	1.0239	-25.7018
33	PQ	1.0384	-6.3601
34	PQ	1.0047	-17.3092
35	PQ	1.0026	4.3435
36	PQ	0.9895	1.3759

37	PQ	1.0049	5.2055
38	PQ	1.0420	-0.0169
39	PQ	1.0367	-23.4241
40	PQ	1.0232	6.4860
41	PQ	1.0341	7.7710
42	PQ	1.0181	8.5554
43	PV	1.0400	-3.3255
44	PV	1.0300	-3.7877
45	PV	1.0300	16.0077
46	PV	1.0300	10.3292
47	PQ	1.0386	-6.7145
48	PQ	1.0221	-6.8928
49	PQ	1.0372	-25.9751
50	PQ	1.0325	-28.4113
51	PQ	1.0667	-12.9755
52	PQ	1.0255	-23.3097
53	PQ	0.9992	-25.8622
54	PQ	1.0536	-20.1316
55	PQ	1.0487	-22.5232
56	PQ	1.0302	-22.7243
57	PQ	1.0655	-8.9113
58	PQ	1.0214	-28.2185
59	PQ	1.0636	-10.2835
60	PQ	1.0234	9.5265
61	PQ	1.0473	2.6579
62	PQ	1.0110	-25.3777
63	PQ	1.0467	-37.1142
64	PQ	1.0234	-40.1751
65	PQ	1.0033	4.1199

Tabela 6: Valores de potência (injetada e gerada) simulados por meio do cálculo do fluxo de potência para o sistema sul sudeste.

Número do barramento	Tipo do barramento	Potência ativa injetada [pu]	Potência reativa injetada [pu]	Potência ativa gerada [pu]	Potência reativa gerada [pu]
1	PV	8.0000	-3.1765	8.0000	-3.1765
2	PV	9.0000	-2.1594	9.0000	-2.1594
3	PV	0.0000	-5.1162	0.0000	-5.1162
4	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	PQ	-12.0000	-1.5000	0.0000	0.0000
9	PQ	-1.0500	-0.3300	0.0000	0.0000
10	PQ	-2.0000	-0.3800	0.0000	0.0000
11	PQ	-4.4000	-1.6000	0.0000	0.0000

12	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13	PQ	-0.7500	-0.2500	0.0000	0.0000
14	PQ	-4.5400	-0.4800	0.0000	0.0000
15	PQ	0.0000	-9.0000	0.0000	0.0000
16	PQ	0.0000	-3.0000	0.0000	0.0000
17	PV	7.0000	-2.1194	7.0000	-2.1194
18	PV	2.5000	-0.8255	2.5000	-0.8255
19	PV	3.5000	-1.4243	3.5000	-1.4243
20	PV	2.0000	-2.2495	2.0000	-2.2495
21	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
22	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23	PQ	-2.1400	-0.7400	0.0000	0.0000
24	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
25	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26	PV	8.0000	-1.5796	8.0000	-1.5796
27	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
28	PQ	-7.0000	-1.5000	0.0000	0.0000
29	SWING	10.5785	-0.1832	10.5785	-0.1832
30	PV	11.5000	0.2186	11.5000	0.2186
31	PV	12.0000	-0.4676	12.0000	-0.4676
32	PQ	-7.3540	-1.9100	0.0000	0.0000
33	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
34	PQ	-0.1340	-0.0420	0.0000	0.0000
35	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
36	PQ	-1.5900	-0.3600	0.0000	0.0000
37	PQ	-0.9400	-0.1800	0.0000	0.0000
38	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
39	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
41	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
42	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
43	PV	7.0000	-1.4377	7.0000	-1.4377
44	PV	6.0000	-1.3327	6.0000	-1.3327
45	PV	7.0000	0.6939	7.0000	0.6939
46	PV	9.5000	-0.6086	9.5000	-0.6086
47	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
48	PQ	-2.3700	-0.5900	0.0000	0.0000
49	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
50	PQ	-11.4900	-0.5360	0.0000	0.0000
51	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
52	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
53	PQ	-8.4470	-4.6910	0.0000	0.0000
54	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
55	PQ	-7.5560	-0.5624	0.0000	0.0000
56	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
57	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
58	PQ	-0.7000	-0.0200	0.0000	0.0000
59	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

60	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
61	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
62	PQ	-12.2800	-4.2500	0.0000	0.0000
63	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
64	PQ	-1.1000	-0.4300	0.0000	0.0000
65	PQ	-4.0300	-1.2600	0.0000	0.0000

5.2.4 CURVA PV E MARGEM DE CARREGAMENTO

Após resoluções sucessivas do fluxo de potência apresentado anteriormente é possível obter o traçado da curva PV para cada sistema analisado. As Figuras 15, 16 e 17 ilustram as curvas dos sistemas de 14, 30 e 65 barramentos, respectivamente.

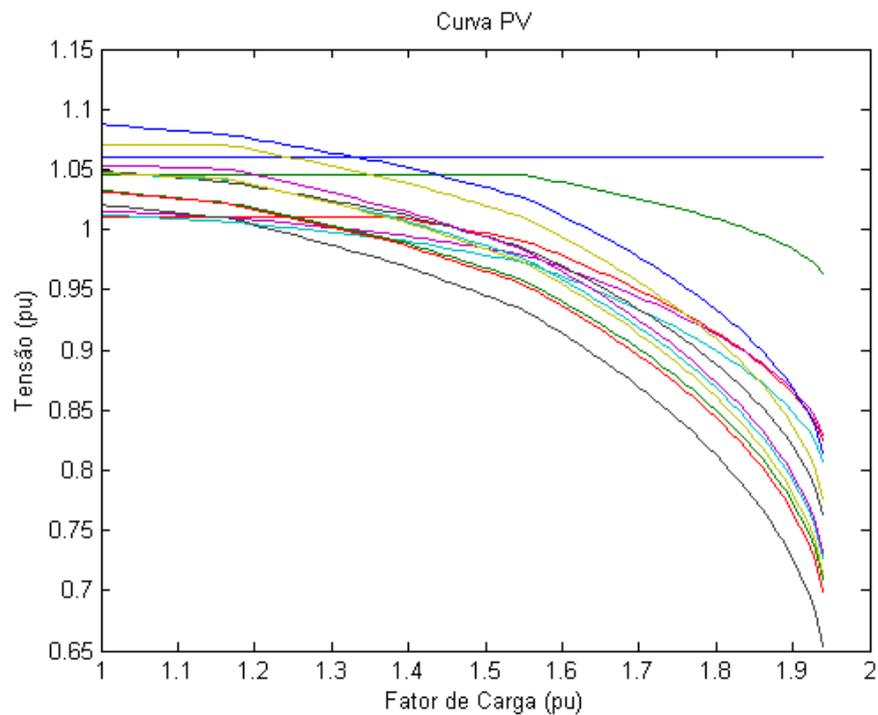


Figura 15: Curva PV para o sistema de 14 barramentos.

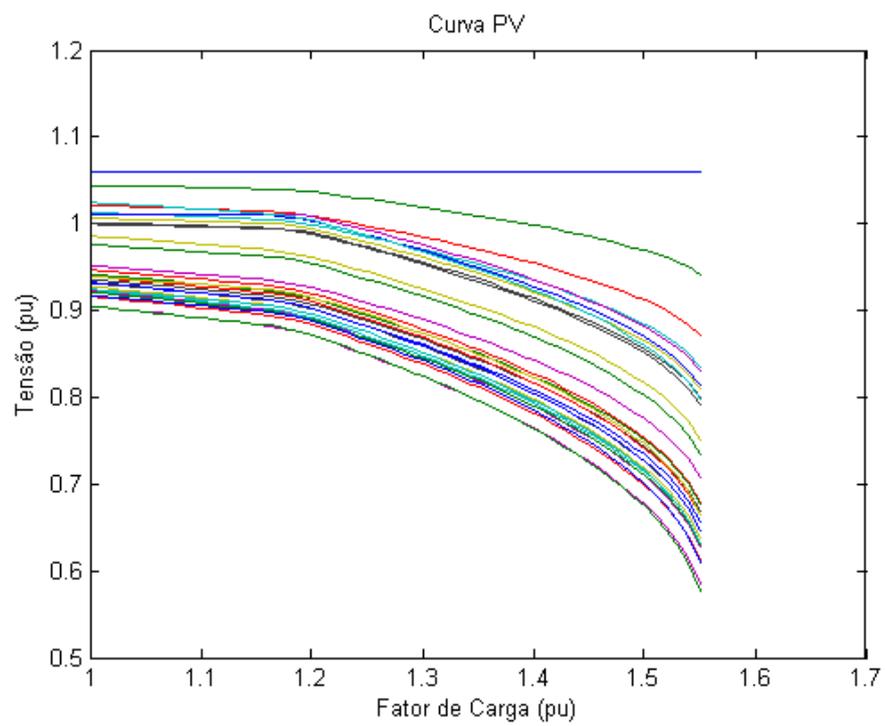


Figura 16: Curva PV para o sistema de 30 barramentos.

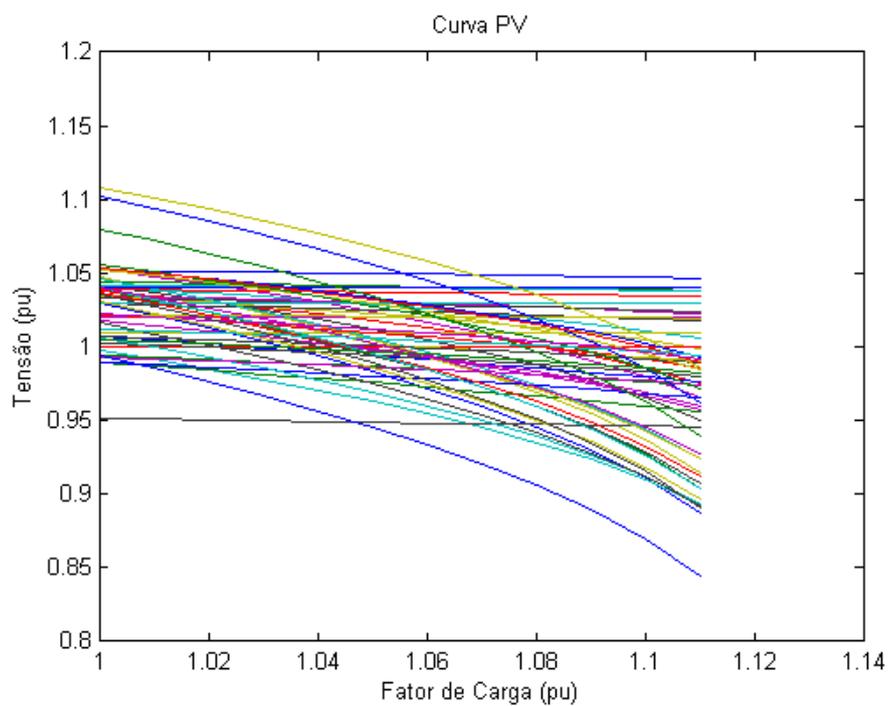


Figura 17: Curva PV para o sistema Sul Sudeste (65 barramentos).

Após o traçado das curvas PV's foi possível determinar a margem de carregamento de cada sistema como pode ser observado na Tabela 7, a seguir:

Tabela 7: Margem de carregamento para os sistemas teste analisados.

Sistemas	Margem de carregamento [pu]
14 barras	1,94
30 barras	1,55
Sul Sudeste	1,11

MOURA (2016) e LEAL (2017) determinam os valores de margem de carregamento para diferentes sistemas testes. No entanto, apenas a primeira referência apresenta resultados para o sistema Sul Sudeste. Na Tabela 8, a seguir, pode-se observar os resultados simulados e os resultados das referências.

Tabela 8: Comparativo das margens de carregamento simuladas e apresentadas por MOURA, 2016 e LEAL, 2017.

Sistemas	Margem de carregamento simulada [pu]	Margem de carregamento (MOURA, 2016)	Margem de carregamento (LEAL, 2017)
14 barras	1,94	1,9110	1,94
30 barras	1,55	1,4940	1,55
Sul Sudeste	1,11	1,1200	-

Os resultados obtidos através da simulação computacional mostram-se similares aos apresentados pelas referências. As pequenas discrepâncias destes valores podem ser justificadas por divergência de parâmetros como tolerância, dados de entrada, número de simulações, entre outros, que podem interferir no resultado final.

A resolução do cálculo do fluxo de potência também mostra-se coerente com a referência, visto que os dados das margens de carregamento expressam semelhança e tais dados são derivados da simulação do fluxo de potência.

Além dos valores de margem de carregamento LEAL (2017) apresenta o traçado das curvas PV's para os sistemas de 14 e 30 barramentos, cujas características se apresentaram

similares as obtidas pela simulação realizada. Embora, não analise o sistema Sul Sudeste, o valor obtido pela margem de carregamento em MOURA (2016) se torna suficiente para validar a solução obtida por meio da simulação.

As próximas seções descrevem a elaboração do algoritmo genético bem como sua aplicação voltada para a expansão da margem de carregamento dos sistemas analisados. É necessário salientar que a otimização a ser realizada não proporciona o melhor ponto operativo do sistema, mas sim, amplia a quantidade de geração distribuída a ser inserida na rede sem que essa entre em colapso.

5.3 ALGORITMO GENÉTICO GENÉRICO

5.3.1 INTRODUÇÃO AO PROBLEMA

Para o melhor entendimento sobre o funcionamento de um algoritmo genético um exemplo apresentado por LINDEN (2012) pode ser resolvido. O autor utiliza AG para maximizar a solução de uma determinada função. Trata-se de uma espécie de algoritmo genético genérico, cujo exemplo pode ser utilizado como base para demais aplicações.

Diante disso, realizou-se a implementação do algoritmo tomando as características do problema proposto para sua confecção.

5.3.2 POPULAÇÃO INICIAL

A primeira etapa para elaborar o algoritmo genético consiste na escolha da população inicial, que pode ser realizada de forma aleatória ou pré-determinada.

Determinou-se uma quantidade de 6 indivíduos para serem aplicados à função de avaliação. Duas simulações foram realizadas como forma de identificar a melhor solução para a equação. Cada cromossomo é composto por oito bits, sendo os quatro primeiros da variável X e os quatro últimos referente ao valor de Y. Para a primeira simulação utilizou-se os mesmos números definidos pelo livro de referência, que é mostrado na Tabela 9. A segunda simulação utilizou-se valores aleatórios para as variáveis X e Y.

Tabela 9: Cromossomos utilizados para a população inicial.

Cromossomo	X	Y	g(x,y)
01000011	4	3	9,5
00101001	2	9	13,7
10011011	9	11	71,0
00001111	0	15	1,0
01010101	5	5	18,7
11100011	14	3	30,7
Somatório das avaliações:			144,6

5.3.3 FUNÇÃO OBJETIVO E FUNÇÃO DE AVALIAÇÃO

A segunda etapa é determinar a função objetivo na qual deseja-se obter a solução. A função objetivo é dada por:

$$f(x, y) = x \cdot y \cdot \text{sen}(y \cdot \pi/4)$$

Como é possível que o valor encontrado seja nulo ou negativo, a função de avaliação será acrescida da unidade:

$$g(x, y) = 1 + f(x, y)$$

Segundo o autor, funções que retornem valores negativos ou nulo resultarão espaços da roleta que nunca serão sorteados e por isso devem ser evitados.

Diferente do livro, que determina inicialmente os valores pré-selecionados, uma função randômica é utilizada para fazer a seleção dos cromossomos mais aptos de acordo com a seleção da função de avaliação para ambas as simulações desenvolvidas.

A seleção é feita de acordo com o “peso” de cada solução, ou seja, os indivíduos que apresentam maiores chances de serem selecionados. A seleção é feita pela roleta viciada e a probabilidade de seleção de cada indivíduo é mostrada no gráfico da Figura 18.

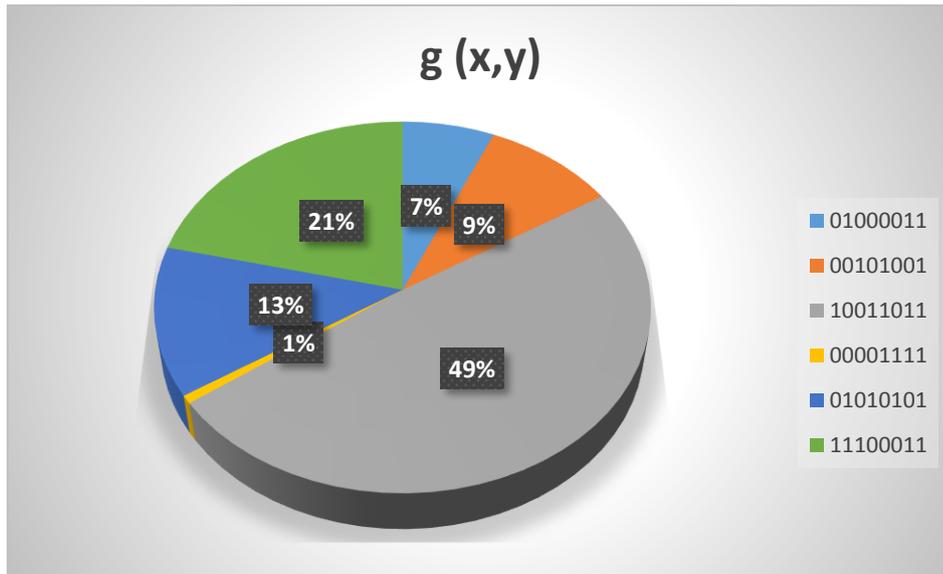


Figura 18: Probabilidade de seleção por meio da roleta viciada.

Como a função objetivo é a mesma e a população inicial foi definida da mesma forma, a solução do problema deve ser igual ou próxima aos valores obtidos pelo exemplo proposto pelo livro, mesmo que a seleção dos indivíduos seja distinta. Esta é uma forma de avaliar o funcionamento adequado do algoritmo genético genérico desenvolvido.

5.3.4 CRUZAMENTO

Após a seleção da primeira geração de cromossomos é realizado o cruzamento. Na referência utilizada o cruzamento é feito de modo que o corte seja realizado de maneira aleatória, e então, realiza-se a inversão dos bits entre os dois indivíduos que estão submetidos ao cruzamento, resultando em outros dois indivíduos para a geração seguinte.

No programa desenvolvido, determinou-se o corte após o quarto bit do cromossomo, como forma de facilitar a programação do mesmo, realizando, então, a inversão das variáveis X e Y.

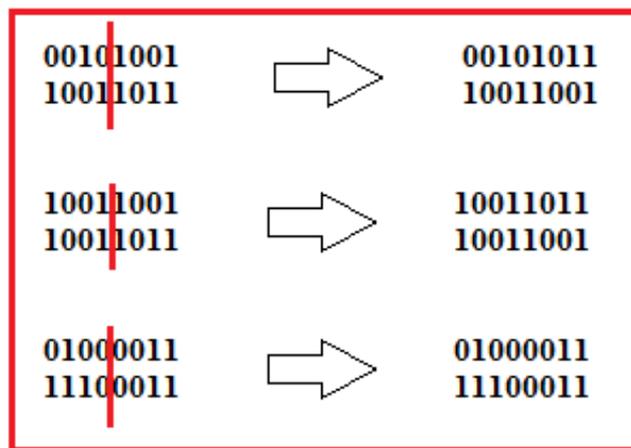


Figura 19: Demonstração do processo de cruzamento do algoritmo genético genérico implementado.

5.3.5 MUTAÇÃO

O livro base utiliza como taxa de mutação uma porcentagem de 1%. Para isso realiza um sorteio com números de 0 a 99. Se o número zero for o sorteado, a mutação em um dos bits do cromossomo acontece, do contrário é mantido o mesmo.

Neste programa, a mutação não foi considerada a fim de simplificar o problema, já que a taxa é mínima e a chances de haver mutação é muito pequena.

5.3.6 RESULTADOS E CONCLUSÕES

Inicialmente desenvolveu-se o algoritmo genético genérico utilizando valores pré-estabelecidos para as variáveis X e Y na primeira simulação. A segunda, utilizou-se valores aleatórios destas variáveis. Para cada simulação realizada foi considerado um número de 20 gerações.

Neste exemplo, o objetivo da elaboração do algoritmo é determinar o melhor valor de X e Y, cujo resultado proporciona a maximização da função. Ou seja, aquele que apresenta o maior valor para $g(x)$.

Para que isso seja possível, a cada geração realizada obteve-se a melhor solução e ao fim das 20 gerações pode-se determinar a solução ótima dentre as melhores de cada geração.

Esta técnica é denominada elitismo, onde seleciona-se os possíveis melhores candidatos à solução.

A Tabela 10, a seguir apresenta os valores obtidos para a função na simulação com valores iniciais estabelecidos das variáveis.

Tabela 10: Resultados obtidos para a simulação com valores de X e Y pré-determinados.

Geração	g (x)	X	Y
1	71,0036	9	11
2	39,8909	5	11
3	71,0036	9	11
4	71,0036	9	11
5	18,6777	5	5
6	32,8198	9	5
7	50,4975	14	5
8	71,0036	9	11
9	50,4975	14	5
10	32,8198	9	5
11	32,8198	9	5
12	32,8198	9	5
13	149,4924	14	15
14	109,8944	14	11
15	50,4975	14	5
16	50,4975	14	5
17	18,6777	5	5
18	50,4975	14	5
19	50,4975	14	5
20	50,4975	14	5

A Tabela 11, a seguir, apresenta os valores obtidos para a função na simulação com valores aleatórios das variáveis.

Tabela 11: Resultados obtidos para a simulação com valores de X e Y aleatórios.

Geração	g (x)	X	Y
1	149,4924	14	15
2	149,4924	14	15
3	90,0955	14	9
4	149,4924	14	15
5	138,8858	13	15
6	149,4924	14	15
7	149,4924	14	15
8	149,4924	14	15
9	90,0955	14	9
10	149,4924	14	15
11	90,0955	14	9
12	149,4924	14	15
13	90,0955	14	9
14	90,0955	14	9
15	90,0955	14	9
16	149,4924	14	15
17	90,0955	14	9
18	90,0955	14	9
19	90,0955	14	9
20	83,7315	13	9

A partir das duas simulações fica evidente que o maior valor obtido para a função foi de 149,4924 referente aos valores de 14 e 15 para X e Y, respectivamente.

Apesar da inicialização do problema ser diferente em cada simulação, o valor ótimo para sua solução foi o mesmo, fato que comprova o bom funcionamento do algoritmo visto que a função a ser solucionada é a mesma e, portanto, deve apresentar valores próximos ou similares.

Realizando um comparativo entre os valores obtidos e os apresentados por (LINDEN, 2012) é possível observar que os resultados são equivalentes aos exibidos nas Tabelas 10 e 11, no entanto ele realiza apenas 3 gerações para descrever o processo e, portanto, obteve um valor menor ao obtido pela simulação realizada. A Tabela 12, a seguir, realiza o comparativo entre os valores simulados e o obtido por LINDEN (2012).

Tabela 12: Comparativo entre a simulação do algoritmo genético genérico e os resultados obtidos por LINDEN, 2012.

Geração	g (x) X e Y definidos	g (x) X e Y aleatórios	g (x) (LINDEN, 2012)
1	71,0036	149,4924	71,0
2	39,8909	149,4924	71,0
3	71,0036	90,0955	109,9

Neste tópico abordou-se uma aplicação genérica para o uso do algoritmo genético, que teve como função objetivo a maximização da equação desejada. A implementação do mesmo teve a finalidade de apresentar de forma simples e eficiente o bom funcionamento do algoritmo.

Na seção a seguir, o algoritmo é implementado, para obter de maneira otimizada, a capacidade de hospedagem de geração distribuída e uma possível ampliação na margem de carregamento do SEP, cuja função objetivo é a curva PV obtida na seção 5.2.

5.4 APLICAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO PARA CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO SEP

5.4.1 BARRAMENTOS CRÍTICOS

Para que o algoritmo genético possa solucionar o problema, deve-se estipular um intervalo onde estão as possíveis soluções. Neste caso em específico, deve-se então determinar os barramentos críticos de cada sistema, por se tratarem de uma área que apresenta maior tendência em levar o sistema ao colapso de tensão.

Na Tabela 13 abaixo são apresentados os respectivos barramentos pertencentes à área crítica de cada sistema. Tais barramentos são determinados em PAIVA (2007) e STB (2011).

Tabela 13: Barramentos críticos dos sistemas analisados.

Sistemas	Barramentos pertencentes a área crítica
14 barras	4, 6, 7, 9, 10, 12, 13, 14
30 barras	25, 27, 28, 29, 30
Sul Sudeste	6, 8, 63, 64

A área crítica é formada pelos barramentos críticos e por suas duas primeiras vizinhanças.

Tais barramentos foram escolhidos visto que a área crítica é aquela que apresenta maior deficiência de potência reativa, responsável por causar baixos níveis de tensão no sistema.

5.4.2 MARGEM DE CARGA

Após a determinação dos barramentos críticos de cada sistema a ser analisado, é possível realizar a otimização da margem de carregamento, por meio da utilização da curva PV apresentada no tópico 5.2, como função objetivo do algoritmo genético.

As curvas PV's traçadas com a utilização do algoritmo genético podem ser observadas a partir das Figuras 20, 21 e 22, onde é possível comparar as curvas obtidas antes e depois do uso do algoritmo genético.

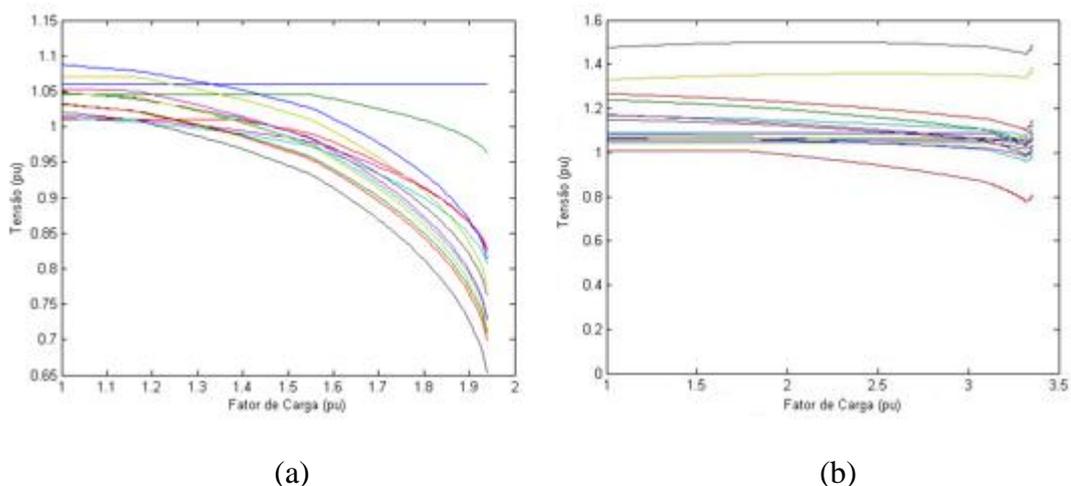
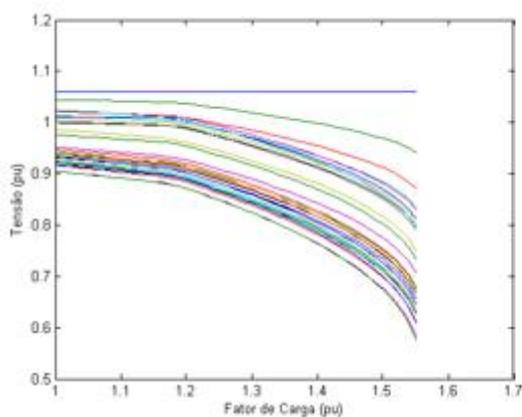
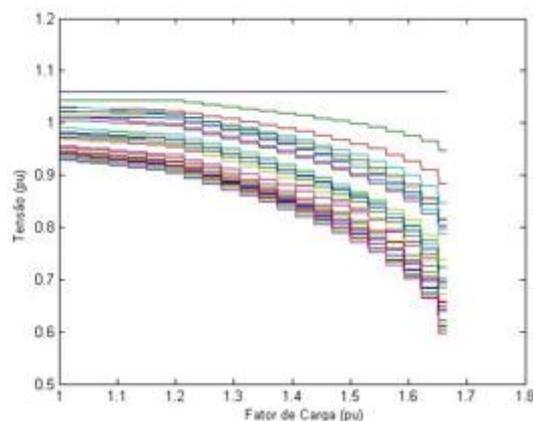


Figura 20: Margem de carregamento para o sistema de 14 barramentos: (a) Antes da utilização do algoritmo genético; (b) Após a utilização do algoritmo genético.

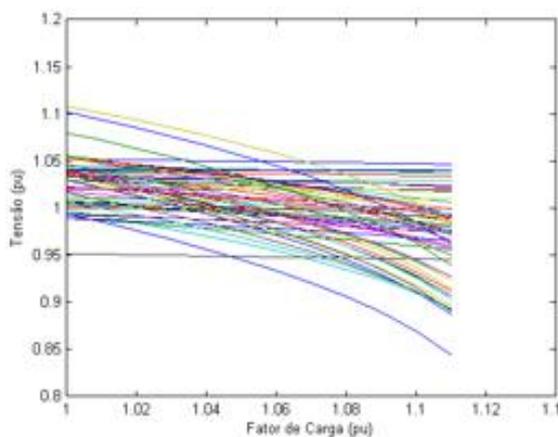


(a)

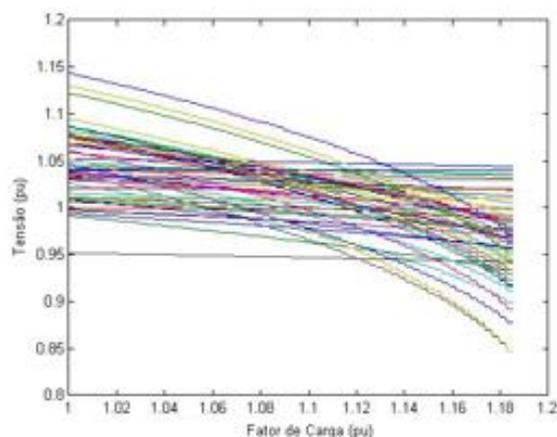


(b)

Figura 21: Margem de carregamento para o sistema de 30 barramentos: (a) Antes da utilização do algoritmo genético; (b) Após a utilização do algoritmo genético.



(a)



(b)

Figura 22: Margem de carregamento para o sistema Sul Sudeste: (a) Antes da utilização do algoritmo genético; (b) Após a utilização do algoritmo genético.

A Tabela 14 apresenta os novos valores da margem de carregamento dos sistemas teste e do sistema real brasileiro, bem como o aumento percentual obtido após a otimização do AG.

Tabela 14: Comparativo entre as margens de carregamento com e sem a otimização do algoritmo genético e percentual de aumento.

Sistemas	Margem de carregamento sem algoritmo genético [pu]	Margem de carregamento com algoritmo genético [pu]	Aumento da margem de carregamento [%]
14 barras	1,94	3,3540	73,78
30 barras	1,55	1,6640	7,36
Sul Sudeste	1,11	1,1850	6,76

A utilização do algoritmo genético proporcionou um acréscimo significativo de 73,78% para o sistema de 14 barramentos quando comparado a resolução da curva sem a utilização do algoritmo.

Para o sistema de 30 barramentos o aumento da margem foi de 7,36% em relação a obtida anteriormente. E no sistema real brasileiro a quantidade de carga ampliada foi de 6,76%.

Ao equiparar a porcentagem de acréscimo de carga para cada sistema, verifica-se que há uma grande discrepância entre os valores. Este notável incremento, para o sistema de 14 barramentos, se dá devido à área crítica, que é formada pela barra crítica e suas duas primeiras vizinhanças, e, corresponde à 57% da quantidade de barramentos deste sistema.

Embora ocorra disparidade entre os aumentos de carga e os sistemas de 30 barramentos e Sul Sudeste apresentem percentual inferior, a ampliação da margem de carregamento é bastante significativa, tendo em vista que trata-se de um sistema real brasileiro, este aumento pode ser equiparado ou até mesmo superior ao sistema de 14 barramentos.

5.4.3 POTÊNCIAS ATIVAS E REATIVAS

Assim como é possível aumentar a margem de carregamento do sistema, com a utilização do algoritmo, também são alteradas as potências ativas e reativas geradas dos barramentos pertencentes à área crítica. Nas Tabelas 15, 16 e 17 estão indicados os valores máximos de geração distribuída que podem ser inseridos nesta área crítica (capacidade de hospedagem) que foram calculados pela técnica de busca do algoritmo genético.

Tabela 15: Relação de potências ativas e reativas geradas antes e após a otimização para o sistema de 14 barramentos.

Potências ativas nos barramentos críticos sem otimização (p.u. na base de 100 MVA)	Potências ativas nos barramentos críticos após a otimização (p.u. na base de 100 MVA)	Potências reativas nos barramentos críticos sem otimização (p.u. na base de 100 MVA)	Potências reativas nos barramentos críticos após a otimização (p.u. na base de 100 MVA)
$P_{G4} = 0,0000$	$P_{G4} = -0,1506$	$Q_{G4} = 0,0000$	$Q_{G4} = 0,5047$
$P_{G6} = 0,0000$	$P_{G6} = -0,6987$	$Q_{G6} = 0,3150$	$Q_{G6} = -0,2004$
$P_{G7} = 0,0000$	$P_{G7} = 0,8328$	$Q_{G7} = 0,0000$	$Q_{G7} = -0,2569$

$P_{G9} = 0,0000$	$P_{G9} = -0,3308$	$Q_{G9} = 0,0000$	$Q_{G9} = 0,2268$
$P_{G10} = 0,0000$	$P_{G10} = 0,1283$	$Q_{G10} = 0,0000$	$Q_{G10} = 1,0989$
$P_{G12} = 0,0000$	$P_{G12} = -0,3606$	$Q_{G12} = 0,0000$	$Q_{G12} = 0,0736$
$P_{G13} = 0,0000$	$P_{G13} = 1,3025$	$Q_{G13} = 0,0000$	$Q_{G13} = 2,2957$
$P_{G14} = 0,0000$	$P_{G14} = 1,4099$	$Q_{G14} = 0,0000$	$Q_{G14} = 1,3763$

Tabela 16: Relação de potências ativas e reativas geradas antes e após a otimização para o sistema de 30 barramentos.

Potências ativas nos barramentos críticos sem otimização (p.u. na base de 100 MVA)	Potências ativas nos barramentos críticos após a otimização (p.u. na base de 100 MVA)	Potências reativas nos barramentos críticos sem otimização (p.u. na base de 100 MVA)	Potências reativas nos barramentos críticos após a otimização (p.u. na base de 100 MVA)
$P_{G25} = 0,0000$	$P_{G25} = 0,5838$	$Q_{G25} = 0,0000$	$Q_{G25} = 1,4587$
$P_{G27} = 0,0000$	$P_{G27} = -0,3439$	$Q_{G27} = 0,0000$	$Q_{G27} = 0,0576$
$P_{G28} = 0,0000$	$P_{G28} = 0,7756$	$Q_{G28} = 0,0000$	$Q_{G28} = -1,5025$
$P_{G29} = 0,0000$	$P_{G29} = 0,1163$	$Q_{G29} = 0,0000$	$Q_{G29} = 1,7457$
$P_{G30} = 0,0000$	$P_{G30} = 0,1459$	$Q_{G30} = 0,0000$	$Q_{G30} = 0,3647$

Tabela 17: Relação de potências ativas e reativas geradas antes e após a otimização para o sistema Sul Sudeste.

Potências ativas nos barramentos críticos sem otimização (p.u. na base de 100 MVA)	Potências ativas nos barramentos críticos após a otimização (p.u. na base de 100 MVA)	Potências reativas nos barramentos críticos sem otimização (p.u. na base de 100 MVA)	Potências reativas nos barramentos críticos após a otimização (p.u. na base de 100 MVA)
$P_{G6} = 0,0000$	$P_{G6} = 1,7958$	$Q_{G6} = 0,0000$	$Q_{G6} = 0,4902$
$P_{G8} = 0,0000$	$P_{G8} = 0,6607$	$Q_{G8} = 0,0000$	$Q_{G8} = 0,0530$
$P_{G63} = 0,0000$	$P_{G63} = 2,5088$	$Q_{G63} = 0,0000$	$Q_{G63} = -0,6442$
$P_{G64} = 0,0000$	$P_{G64} = 1,0635$	$Q_{G64} = 0,0000$	$Q_{G64} = -0,3712$

Por meio das Tabelas 15, 16 e 17 percebe-se que a maioria das potências geradas nos barramentos críticos, sejam elas ativas ou reativas, apresentaram valores nulos e a após a utilização do algoritmo genético todas as potências foram aumentadas, independente do sentido que o fluxo é direcionado. Esta ocorrência evidencia o aumento da margem de carregamento e ainda traça os limites de potências (capacidade de hospedagem) que podem ser inseridas no sistema elétrico sem que lhe causem prejuízos.

5.5 DISCUSSÕES GERAIS

Com base nos resultados obtidos em cada sistema teste do IEEE e pelo sistema real analisado, pode-se afirmar com clareza que a implantação do algoritmo genético apresentou desempenho satisfatório, ampliando a margem de carregamentos para todos os casos analisados.

A metodologia implementada fornece a máxima capacidade de hospedagem dos sistemas determinando a quantidade de potência a ser injetada na rede e também evitando um excesso de potência reativa, e conseqüentemente um perfil de tensão elevado, o que mantém então o sistema operando dentro do limite de estabilidade.

Este resultado é de suma importância visto que é possível melhorar o planejamento e operação do sistema elétrico de potência. Trata-se de uma solução vantajosa, caso seja necessária a ampliação da rede elétrica, evitando possíveis colapsos causados pela violação limite da capacidade de hospedagem.

CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

Nesta dissertação a proposta discutida foi baseada na hipótese de determinar os limites operativos do sistema, bem como identificar a quantidade de geração distribuída que pode ser inserida no mesmo sem que este entre em situações críticas.

Para isto, a metodologia utilizada teve como fundamento identificar a margem de carregamento atual de dois sistemas testes do IEEE e um sistema real brasileiro e então otimizar tais margens a fim de identificar a quantidade máxima suportada pela rede de inserção de geração distribuída. A otimização da margem de carregamento foi realizada por meio do algoritmo genético, cuja função objetivo foi a Curva PV (obtida por meio de sucessivas resoluções do fluxo de potência).

A partir disso, foi possível determinar e ampliar a capacidade de hospedagem de geração distribuída por meio da utilização do algoritmo genético. Dentre os sistemas analisados, o sistema de 14 barramentos se sobressaiu em relação aos demais devido ao acréscimo de 73,78% da margem de carregamento do sistema. Os sistemas de 30 barramentos e Sul Sudeste apresentaram, respectivamente, um incremento de carga de 7,36 e 6,76%. Embora haja uma disparidade, devido a quantidade de barramentos críticos presente em cada sistema analisado, entre os acréscimos de carga dos sistemas, todos os incrementos são de suma importância. Por se tratar de um sistema real, o acréscimo de carga, para o sistema Sul Sudeste, é muito significativo e proporciona uma solução vantajosa caso seja necessária uma ampliação da rede elétrica, respeitando os limites operativos do sistema.

A utilização de técnicas de otimização proporciona um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis, evitando, assim, a necessidade de implantação de novas unidades geradoras, mesmo que temporariamente. Este fato beneficia não apenas a diminuição com custos, mas também minimiza os impactos causados ao meio ambiente.

Em decorrência do conhecimento dos limites operativos do sistema é possível planejar e tomar decisões no SEP de forma mais eficiente, visto que tais resultados fornecem informações essenciais para minimizar possíveis colapsos e demais danos no qual o sistema está susceptível.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Propõe-se como trabalhos futuros a aplicação da proposta deste trabalho em conjunto com dispositivos FACTS que podem ampliar ainda mais a margem de carregamento dos sistemas e conseqüentemente a capacidade de hospedagem, de modo a retardar possíveis implantações de grandes novas unidades geradoras. Ainda como proposta, utilizar a metodologia em outros sistemas teste e em sistemas reais para sua melhor validação, bem como analisar o comportamento da geração distribuída levando em consideração outras subáreas do sistema elétrico.

6.3 PUBLICAÇÕES

MOURA, Renan Souza *et al.* Estudos sobre a capacidade de hospedagem de geração distribuída em sistemas elétricos de potência utilizando algoritmo genético. **ForScience**: revista científica do IFMG, Formiga, v. 7, n. 1, e00452, jan./jun. 2019. DOI: 10.29069/forscience.2019v7n1.e00452.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Resolução normativa nº 235**. 2006. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2006235.pdf>. Acesso em: 10/04/2019.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Geração distribuída ultrapassa 20 mil conexões**. 2018. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/geracao-distribuida-ultrapassa-20-mil-conexoes/656877. Acesso em: 10/04/2019.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL **Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL**. 2017. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+T%C3%A9cnica_0056_PROJE%C3%87%C3%95ES+GD+2017/38cad9ae-71f6-8788-0429-d097409a0ba9. Acesso em: 05/01/2019.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Geração Distribuída**. 2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Acesso em: 05/01/2019.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **BIG - Banco de Informações de Geração**. Capacidade de Geração do Brasil. 2019 [A]. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 28/01/2019.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **ANEEL abre audiência pública para analisar revisão de regras para geração distribuída**. 2019 [B]. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/aneel-abre-audiencia-publica-para-analisar-revisao-de-regras-para-geracao-distribuida/656877. Acesso em: 04/02/2019.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Perdas de carga**. 2019 [C]. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=801&idPerfil=4>. Acesso em: 08/04/2019.

ALAM, M. S.; DE, M. **Optimal reactive power dispatch using hybrid loop-genetic based algorithm**. 2016. National Power Systems Conference (NPSC). (19-21 Dec. 2016). IEEE. Bhubaneswar, India.

- ALGHUWAINEM, S. M. *Transient and islanding performance of grid-connected induction generator feeding induction motor and resistive loads*. 2011. International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 15-18 de maio de 2011. IEEE. Niagara Falls, ON, Canada.
- BABU, Y. R.; RAO, C. S. *Analysis of grid tied distributed generation and power quality enhancement using dual SAPF*. 2017. International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS) (1-2 Aug. 2017). IEEE. Chennai, India.
- BANEJAD, M.; KAZEMINEJAD, M. *Load effects on voltage stability in distribution network with considering of distributed generation*. 2017. 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). 12-13 Oct. 2017. IEEE. Riga, Latvia.
- BHATTACHARYA, D.; BISWAS, S. *The impacts of distributed generation on voltage stability*. 2017. IEEE Calcutta Conference (CALCON). 2-3 Dec. 2017. Kolkata, India.
- BENTO, E. P; KAGAN, N. **Algoritmos genéticos e variantes na solução de problemas de configuração de redes de distribuição**. 2008. Revista Controle & Automação/Vol.19 no.3/Julho, Agosto e Setembro 2008. ENERQ - Centro de Estudos em Regulação e Qualidade de Energia - Escola Politécnica – USP. São Paulo, 2008.
- BOLLEN, M. H. J. *Integration of distributed generation in the power system*. Canada. IEEE press series on power engineering, 1960.
- BORGES, T.H. **Panorama da geração distribuída de energia elétrica no Brasil: Avanços e Desafios**. 2017. 19f. Revista On-line IPOG Especialize. Ed.13, v.1, n.13. – Instituto de Pós-Graduação – IPOG. Goiânia, 2017.
- BRESSAN, N. T. **Análise do crescimento de geração distribuída brasileira com ênfase no potencial energético da região Norte**. 2016. Trabalho de conclusão de curso. 77f. Universidade de São Paulo – USP. São Carlos, 2016.
- CANOSSA, J. H. **Um Programa Interativo para Estudos de Fluxo de Potência**. 2007, 166f. Tese (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista – UNESP. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Ilha Solteira, 2007.
- CARVALHO, M. R. **Estudo comparativo de fluxo de potência para sistemas de distribuição radial**. 2006, 94f. Tese (Mestrado) – Universidade de São Paulo –USP. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2006.

- CHEN, X.; BROMBERG, D.; LI, X.; PILEGGI, L., HUG, G. *A robust and efficient power series method for tracing PV curves*. 2015. IEEE North American Power Symposium (NAPS). Charlotte, NC, USA.
- CHEN, Z.; ZHAO, J.; ZHEN, X.; SHEN, Y.; LIU, J.; ZHENG, C.; LI, J.; LIU, J.; MA, Y. *Voltage stability analysis of wind farms integration connected to distribution network*. 2017. IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing, China.
- CUI, Y.; FENG, Y.; FAN, H.; JIANG, Y. *The study of voltage stability comprehensive controls for large city receiving-end grid*. 2017. 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Xi'an, China.
- DARWIN, C. “*On the Origin of Species*”. Editora: John Murray, 1859.
- DU, W.; BI, J.; WANG, T.; WANG, H. *Impact of grid connection of large-scale wind farms on power system small-signal angular stability*. 2015. CSEE Journal of Power and Energy Systems (Volume: 1, Issue: 2, June 2015). Page(s): 83 – 89.
- DULĂU, L. I.; ABRUDEAN, M.; BICĂ, D. *Automation of a distributed generation system*. 2014. 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC) (2-5 Sept. 2014). IEEE. Cluj-Napoca, Romania.
- Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Plano decenal de expansão de energia 2026. Capítulo 4: Transmissão de energia elétrica**. 2017. Disponível em: http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/topico-70/Cap4_Texto.pdf. Acesso em 15/01/2018.
- GOLDBERG, D. E. (1989). Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison-Wesley, Reading, MA
- GUOYONG, Z.; YALOU, L.; GUANGMING, L. Y. L.; CHANG, X.; JIANFENG, Y. *Rationality evaluation of schedule power flow data for large power grid*. 2017. 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE) - Chengdu, China.
- HOLLAND, J.H. *Adaptation in natural and artificial systems*. Univ. of Michigan Press, AnnArbor, 1975.
- HU, L. J.; LIU, K.; FU, Y.; LI, P. *Capacity Optimization of Wind /PV/Storage Power System Based on Simulated Annealing-Particle Swarm Optimization*. 2018. 37th Chinese Control Conference (CCC). (25-27 July 2018). IEEE. Wuhan, China.

ISLAM, N. N.; HANNAN, M. A.; SHAREEF, H.; MOHAMED, A. *Power system stabilizer design using BAT optimization algorithm in multimachine power system*. 2013 [A]. IEEE Student Conference on Research and Development. (16-17 Dec. 2013). IEEE. Putrajaya, Malaysia.

ISLAM, N. N.; HANNAN, M. A.; SHAREEF, H.; MOHAMED, A. *SVC damping controller design based on firefly optimization algorithm in multi machine power system*. 2013 [B]. IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT). (18-20 Nov. 2013). IEEE. Lankgwawi, Malaysia.

Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) - *1662-2016 - IEEE Recommended Practice for the Design and Application of Power Electronics in Electrical Power Systems*. Revision of IEEE Std 1662-2008. 9 March 2017.

Instituto Nacional de Eficiência Energética – INEE. **O que é geração distribuída**. 2018. Disponível em: http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp. Acesso em: 02/01/2019.

JOBANPUTRA, J; KOTWAL, C. *Optimal Power Dispatch using Particle Swarm Optimization*. 2018. International Conference on Smart Electric Drives and Power System (ICSEDPS). (12-13 June 2018). IEEE. Nagpur, India.

KAMARUZZAMAN, Z. A.; MOHAMED, A. *Impact of grid-connected photovoltaic generator using P-V curve and improved voltage stability index*. 2014. International Conference on Power and Energy (PECon). IEEE. Kuching, Malaysia.

KARBALAEI, F.; SHAHRIAR Abasi, S. *Prediction of Voltage Collapse in Presence of Voltage Dependent Loads by PV Curve Approximation*. 2011. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference – IEEE 2011. Wuhan, China.

KUDAL, S.; ANKALIKI, S.; SUNAGAR, K.; PUTHRAN, V. *Comparative performance analysis of power systems*. 2016. International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer and Optimization Techniques (ICEECCOT). (9-10 Dec. 2016). IEEE. Mysuru, India.

KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, 1994.

KUNDUR, P; PASERBA, J.; AJJARAPU, V; ANDERSON, G.; BOSE, A; CANIZARES, C; HATZARAYRIOU, N; HILL, D.; STANKOV, A.; TAYLOR, C; CUTSEM, T.V.; VITTAL,

V. *Definition and classification of power system stability*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.19, N°2, maio de 2004.

LEAL, R. R. **Otimização da alocação de capacitores shunt para aumento da margem de carga em sistemas elétricos de potência, utilizando algoritmo genético**. 2017, 70f. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso). Instituto Federal de Minas Gerais – IFMG. Campus Formiga. Formiga, 2017.

LIN, C.; JIANG, J. N.; TANG, C. Y.; RUNOLFSSON, T. *A study on the impact of control on PV curve associated with doubly fed induction generators*. 2011. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. 2011. Phoenix, AZ, USA.

LINDEN, RICARDO. **Algoritmos genéticos** / Ricardo Linden. – 2. Ed. – Rio de Janeiro: Brasport, 2008.

LINDEN, RICARDO. **Algoritmos Genéticos**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2012.

LIU, B.; QIAN, X.; LI, J.; ZHANG, Y. *Optimal sizing of distributed generation based on chaotic free-search algorithm in an island microgrid*. 2017. Chinese Automation Congress (CAC) (20-22 Oct. 2017). IEEE. Jinan, China.

MALANGE, F. C. V. **Proposta de parametrização para o fluxo de carga continuado visando redução de perdas na transmissão e o aumento da margem estática de estabilidade de tensão**. 2008, 139f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Ilha Solteira, 2008.

MARTÍNEK, Z.; KLOR, T.; HOLÝ, J. *Reliability of the electrical power system*. 2014. 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). (12-14 May 2014). IEEE. Brno, Czech Republic.

MATVOZ, D.; LESKOVEC, R.; MAKSÍĆ, M. *Optimized reactive power characteristics for distributed generation sources in the low voltage network*. 2017. IEEE Manchester PowerTech (18-22 June 2017). IEEE. Manchester, UK.

MOURA, R. S. **Estudo do efeito do tipo da curva QV em simulações dinâmicas em sistemas elétricos de potência**. 2016, 87f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Itajubá -UNIFEI. Itajubá, 2016.

MUSTAFFA, S. A. S.; MUSIRIN, I.; OTHMAN, M. M.; SALIMIN, R. H. *Load management for Voltage Stability control in multi-area power system*. 2016. 6th IEEE International

Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE). Batu Ferringhi, Malaysia.

NARUTO, D. T. **Vantagens e desvantagens da geração distribuída e estudo de caso de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica**. 2017. 97f. Dissertação. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2017.

NATORI, K.; TANAKA, T. TAKAHASHI, Y.; SATO, Y. *A study on high-efficiency floating multi-terminal power flow controller for next-generation DC power networks*. 2017. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Cincinnati, OH, USA.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Procedimentos de rede, submódulo 23.3, diretrizes e critérios para estudos elétricos**, 2001.

PAIVA, I. de F. B. de . **Comportamento da curva QV nas barras da região crítica de um sistema elétrico**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Itajubá, 2007.

PRIYA, G. S.; GEETHANJALI, M. *Design and Development of Distance Protection Scheme for Wind Power Distributed Generation*. 2018. National Power Engineering Conference (NPEC). (9-10 March 2018). IEEE. Madurai, India.

QIN, X.; LI, B.; XIA, T.; MA, S.; WANG, Y.; ZHANG, Y.; ZHOU, Q.; ZENG, P.; LIU, N.; SHENG, X. *Study of the application of active power adjustment and control technology based on modern energy storage into power system stability control and voltage adjustment*. 2014. International Conference on Power System Technology. (20-22 Oct. 2014). IEEE. Chengdu, China.

REN, B. X.; CAI, H.; DU, W. J.; WANG, H. F.; FAN, L. L. *Analysis of power flow control capability of a unified power flow controller to be installed in a real Chinese power network*. 2016. 12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2016). Beijing, China.

RIZZI, M.; FURTADO, J. C.; DA COSTA, A. B.; GERBASE, A. E.; FERRÃO, M. F. **Método do Enxame de Partículas para Otimização de Modelos de Regressão Multivariada Empregados na Determinação de Biodiesel em Blendas Biodiesel/Óleo Vegetal/Diesel**. 2016. Revista Virtual de Química, Vol 8, No. 6, pags- 1877-1892.

ROSA, T. O.; LUZ, H. S. **Conceitos Básicos de Algoritmos Genéticos: Teoria e Prática**. In: XI Encontro de Estudantes de Informática do Tocantins, 2009, Palmas. Anais do XI Encontro de Estudantes de Informática do Tocantins. Palmas: Centro Universitário Luterano de Palmas, 2009. p. 27-37.

SALGADO, D. A. **Uma abordagem paramétrica do impacto da geração distribuída sobre as correntes de curto-circuito e na proteção de redes de distribuição**. 2015. Tese (Mestrado). 114f. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2015.

SGUAÇABIA, R. R. **Avaliação do impacto de geração distribuída sobre o sistema de proteção de sobrecorrente de uma rede de distribuição operando em ilhamento intencional**. 2015. Tese (Mestrado). 163f. Universidade de São Paulo – USP. São Carlos, 2015.

SHAHID, A. *Performance evaluation of sinusoidal and Space Vector Pulse-Width-Modulation for power quality enhancement in distributed generation systems*. 2015. 6th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG) (22-25 June 2015). IEEE. Aachen, Germany.

SILVA, R. G. **Aplicação dos Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada na Avaliação da Estabilidade de Tensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

STB - Sistemas-Teste brasileiros para uso didático e análise computacional de Sistemas Elétricos de Potência. 2011. Disponível em: <<http://www.sistemas-teste.com.br/>>. Acesso em: 26 abr. 2019.

SOBOLEVSKIS, A.; ZICMANE, I. *Analysis of vulnerability of the Latvian electrical power system*. 2016. 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). (7-10 June 2016). IEEE. Florence, Italy.

SOUZA, A.C.Z; QUINTANA, V.H. *Identification of voltage collapse margins in power systems*. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 14-17 de Setembro de 1993.

SOUZA, P. A.; SANTOS, G. B. D.; MARIANO, D. B. V. *Analysis of active and reactive power injection in distributed systems with photovoltaic generation*. 2018. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE) (12-16 May 2018). IEEE. Niterói, Brazil.

SOUZA, S. A. **Algoritmos Genéticos aplicados à proteção e estimação de harmônicos em sistemas elétricos de potência**. 2008. 259f. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos, 2008.

SHU, Y.; TANG, Y. *Analysis and recommendations for the adaptability of China's power system security and stability relevant standards*. 2017. CSEE Journal of Power and Energy Systems (Volume: 3, Issue: 4, Dec. 2017). Page(s): 334 – 339.

TESHAGER, B. G.; MINXIAO, H.; PATROBERS, S.; KHAN, Z. W.; TUAN, L. K.; SHAH, F. M. *Direct power control strategy based variable speed pumped storage system for the reduction of the wind power fluctuation impact on the grid stability*. 2018. 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018). (10-12 April 2018). IEEE. Doha, Qatar.

TORTELLI, O. D. **Sistemas elétricos de potência**. 2009. Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009. Disponível em: http://www.eletrica.ufpr.br/ufpr2/professor/8/Mini_curso8.pdf. Acesso em: 10/04/2019.

USAMA, M.; MOHAMED, H.K.; EL-MADDAH, I. A.M.; SHEDIED, M.A. *A smart voltage stability maneuver algorithm for voltage collapses mitigation*. 2017. 12th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES). 19-20 Dec. 2017. Cairo, Egypt.

VILELA, A. O. R. **Margem de estabilidade de tensão no planejamento dos sistemas elétricos: análise do impacto do despacho da geração**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

WEN, Z.; CHEN, B. *Load dispatch optimization of AGC system based on improved genetic algorithm*. 2017. International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM). (19-21 Nov. 2017). IEEE. Ningbo, China.

WU, X.; GUO, X.; LI, F.; ZHANG, A. *Reactive Power Optimization of Distribution Network on Improved Genetic Algorithm*. 2018. 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). (12-14 Oct. 2018). IEEE. Chongqing, China.

XIA, D.; HAN, J.; ZHANG, L.; ZHANG, X.; XU, J.; WANG, Z. *Research on flexible power multi-objective optimization plan method oriented to grid-connected intermittent energy*.

2017. Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). (26-28 Nov. 2017). IEEE. Beijing, China.

YAMUJALA, S.; FATIMA, M.; TEJA, I. A. S.; LAHARI, Y. *Present scenario of distributed generation in India — Technologies, cost analysis & power quality issues*. 2014. Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their impact on Humanity (CIPECH). (28-29 Nov. 2014). Pages 417-421. IEEE. Ghaziabad, India.

YANG, K.; GONG, Y.; ZHANG, P.; LIU, Z. *A reactive power compensation method based on tracing the power flow and loss function of power system*. 2015. 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). Changsha, China.

YANG, J.; XU, Z.; WANG, W.; CAI, H. *Implementation of a novel unified power flow controller into Newton-Raphson load flow*. 2017. IEEE Power & Energy Society General Meeting. Chicago, IL, USA.

ZHIJIAN, L.; JUN, Y.; QI, S. *Optimal power flow research on distributed network considering distributed generation*. 2016. China International Conference on Electricity Distribution (CICED) (10-13 Aug. 2016). IEEE. Xi'an, China.

ZIMMER, H.; NIERSBACH, B.; HANSON, J. *Optimization of power plant AVR parameters to improve transient voltage stability*. 2017. 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG). (4-6 April 2017). IEEE. Cadiz, Spain.

ZUO, J.; ZHANG, B.; XIANG, M.; SHEN, Y.; CHEN, Y. *Study of transient voltage stability with transient stability probing method in Hunan power grid*. 2017. 4th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI). Hangzhou, China.

ANEXO A

Para cada sistema utiliza-se duas matrizes de dados que são apresentadas neste anexo, com suas respectivas características:

MATRIZ A

- Coluna 1: Tipo da barra (Slak, PQ ou PV)
- Coluna 2: Tensão na barra
- Coluna 3: Ângulo da tensão na barra
- Coluna 4: Potência Ativa gerada na barra
- Coluna 5: Potência Ativa consumida na barra
- Coluna 6: Potência Reativa consumida na barra
- Coluna 7: Potência Reativa gerada na barra
- Coluna 8: Potência Reativa máxima gerada
- Coluna 9: Potência Reativa mínima gerada
- Coluna 10: Susceptância shunt instalada
- Coluna 11: Área pertencente a barra
- Coluna 12: Barra de tensão controlada
- Coluna 13: Se diferente de zero, indica número da barra interna do MIT associada a esta barra

MATRIZ C

- Coluna 1: Barra de origem
- Coluna 2: Barra de término
- Coluna 3: Resistência em pu
- Coluna 4: Reatância em pu
- Coluna 5: Susceptância shunt total da linha
- Coluna 6: Presença ou não de Tap (se houver, valor igual a 1)
- Coluna 7: Se tiver Tap, utilizar o valor do Tap

SISTEMA 14 BARRAMENTOS

MATRIZ A

1.060	0	2.3240	0	0	0	999.0000	-990000	0
1.0450	-5.0000	1.6600	0.2170	0.1270	0	0.5000	-99.0000	0
1.1000	-13.0000	0	0.9420	0.1900	0	0.4000	-99.0000	0
1.0190	-10.0000	0	0.4780	-0.0390	0	999.0000	-99.0000	0
1.0200	-9.0000	0	0.0760	0.0160	0	999.0000	-99.0000	0
1.0700	-14.0000	0	0.1120	0.0750	0	0.2400	-99.0000	0
1.0620	-13.0000	0	0	0	0	999.0000	-99.0004	0
1.0900	-13.0000	0	0	0	0	0.2400	-99.0000	0
1.0563	-15.0000	0	0.2950	0.1660	0	999.0000	-99.0000	0
1.0503	-15.0000	0	0.0900	0.0580	0	999.0000	-99.0000	0
1.0571	-15.0000	0	0.0350	0.0180	0	999.0000	-99.0000	0
1.0552	-15.0000	0	0.0610	0.0160	0	999.0000	-99.0000	0
1.0504	-15.0000	0	0.1350	0.0580	0	999.0000	-99.0000	0
1.0358	-16.0000	0	0.1490	0.0500	0	999.0000	-99.0000	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

MATRIZ C

1.0000	2.0000	0.0193	0.0591	0.0066	0	0
1.0000	5.0000	0.0540	0.2230	0.0061	0	0
2.0000	3.0000	0.0469	0.1979	0.0055	0	0
2.0000	4.0000	0.0581	0.1763	0.0047	0	0
2.0000	5.0000	0.0569	0.1738	0.0043	0	0
3.0000	4.0000	0.0670	0.1710	0.0043	0	0
4.0000	5.0000	0.0133	0.0421	0.0016	0	0
7.0000	4.0000	0	0.2091	0	1.0000	0.9780
9.0000	4.0000	0	0.5561	0	1.0000	0.9690
6.0000	5.0000	0	0.2520	0	1.0000	0.9320
6.0000	11.0000	0.0949	0.1989	0	0	0
6.0000	12.0000	0.1229	0.2558	0	0	0
6.0000	13.0000	0.0661	0.1302	0	0	0
7.0000	8.0000	0	0.1761	0	0	0
7.0000	9.0000	0	0.1100	0	0	0
9.0000	10.0000	0.0318	0.0845	0	0	0
9.0000	14.0000	0.1271	0.2703	0	0	0
10.0000	11.0000	0.0820	0.1920	0	0	0
12.0000	13.0000	0.2209	0.1998	0	0	0
13.0000	14.0000	0.1709	0.3480	0	0	0

SISTEMA 30 BARRAS

MATRIZ A

1.0000	1.0600	0	2.6020	0	0	0	0	0	0
3.0000	1.0430	-5.5084	0.4000	0.2170	0.1270	0	0.5000	-0.4000	0
2.0000	1.0183	-7.9792	0	0.0240	0.0120	0	0	0	0
2.0000	1.0089	-9.6338	0	0.0760	0.0160	0	0	0	0
3.0000	1.0100	-14.4186	0	0.9420	0.1900	0	0.4000	-0.4000	0
2.0000	1.0074	-11.3461	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	1.0007	-13.1363	0	0.2280	0.1090	0	0	0	0
3.0000	1.0100	-12.1468	0	0.3000	0.3000	0	0.4000	-0.1000	0
2.0000	1.0378	-14.3514	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	1.0197	-15.9564	0	0.0580	0.0200	0	0	0	0
3.0000	1.0820	-14.3514	0	0	0	0	0.2400	-0.0600	0
2.0000	1.0490	-15.4903	0	0.1120	0.0750	0	0	0	0
3.0000	1.0710	-15.4903	0	0	0	0	0.2400	-0.0600	0
2.0000	1.0315	-16.3769	0	0.0620	0.0160	0	0	0	0
2.0000	1.0246	-16.3946	0	0.0820	0.0250	0	0	0	0
2.0000	1.0293	-15.9574	0	0.0350	0.0180	0	0	0	0
2.0000	1.0171	-16.1689	0	0.0900	0.0580	0	0	0	0
2.0000	1.0105	-16.9591	0	0.0320	0.0090	0	0	0	0
2.0000	1.0053	-17.0978	0	0.0950	0.0340	0	0	0	0
2.0000	1.0081	-16.8706	0	0.0220	0.0070	0	0	0	0
2.0000	1.0071	-16.4078	0	0.1750	0.1120	0	0	0	0
2.0000	1.0077	-16.3884	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	1.0089	-16.6856	0	0.0320	0.0160	0	0	0	0
2.0000	0.9965	-16.7186	0	0.0870	0.0670	0	0	0	0
2.0000	1.0000	-16.4318	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	0.9820	-16.8665	0	0.0350	0.0230	0	0	0	0
2.0000	1.0109	-15.9790	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	1.0035	-11.9764	0	0	0	0	0	0	0
2.0000	0.9908	-17.2399	0	0.0240	0.0090	0	0	0	0
2.0000	0.9791	-18.1457	0	0.1060	0.0190	0	0	0	0

MATRIZ C

1.0000	2.0000	0.0192	0.0575	0.0264	0	1.0000
1.0000	3.0000	0.0452	0.1852	0.0204	0	1.0000
2.0000	4.0000	0.0570	0.1737	0.0184	0	1.0000
3.0000	4.0000	0.0132	0.0379	0.0042	0	1.0000
2.0000	5.0000	0.0472	0.1983	0.0209	0	1.0000
2.0000	6.0000	0.0581	0.1763	0.0187	0	1.0000
4.0000	6.0000	0.0119	0.0414	0.0045	0	1.0000
5.0000	7.0000	0.0460	0.1160	0.0102	0	1.0000
6.0000	7.0000	0.0267	0.0820	0.0085	0	1.0000
6.0000	8.0000	0.0120	0.0420	0.0045	0	1.0000
6.0000	9.0000	0	0.2080	0	1.0000	0.9780
6.0000	10.0000	0	0.5560	0	1.0000	0.9690
9.0000	11.0000	0	0.2080	0	1.0000	1.0000

9.0000	10.0000	0	0.1100	0	1.0000	1.0000
4.0000	12.0000	0	0.2560	0	1.0000	0.9320
12.0000	13.0000	0	0.1400	0	1.0000	1.0000
12.0000	14.0000	0.1231	0.2559	0	0	1.0000
12.0000	15.0000	0.0662	0.1304	0	0	1.0000
12.0000	16.0000	0.0945	0.1987	0	0	1.0000
14.0000	15.0000	0.2210	0.1997	0	0	1.0000
16.0000	17.0000	0.0824	0.1923	0	0	1.0000
15.0000	18.0000	0.1073	0.2185	0	0	1.0000
18.0000	19.0000	0.0639	0.1292	0	0	1.0000
19.0000	20.0000	0.0340	0.0680	0	0	1.0000
10.0000	20.0000	0.0936	0.2090	0	0	1.0000
10.0000	17.0000	0.0324	0.0845	0	0	1.0000
10.0000	21.0000	0.0348	0.0749	0	0	1.0000
10.0000	22.0000	0.0727	0.1499	0	0	1.0000
21.0000	22.0000	0.0116	0.0236	0	0	1.0000
15.0000	23.0000	0.1000	0.2020	0	0	1.0000
22.0000	24.0000	0.1150	0.1790	0	0	1.0000
23.0000	24.0000	0.1320	0.2700	0	0	1.0000
24.0000	25.0000	0.1885	0.3292	0	0	1.0000
25.0000	26.0000	0.2544	0.3800	0	0	1.0000
25.0000	27.0000	0.1093	0.2087	0	0	1.0000
28.0000	27.0000	0	0.3960	01.0000	0	0.980
27.0000	29.0000	0.2198	0.4153	0	0	1.0000
27.0000	30.0000	0.3202	0.6027	0	0	1.0000
29.0000	30.0000	0.2399	0.4533	0	0	1.0000
8.0000	28.0000	0.0636	0.2000	0.0214	0	1.0000
6.0000	28.0000	0.0169	0.0599	0.0065	0	1.0000

SISTEMA SUL SUDESTE

MATRIZ A

3.0000	1.0000	3.5600	8.0000	0.0000	0.0000	-3.320	4.0000	-4.0000	0	1.0000	1.0000	0
3.0000	1.0100	-1.3000	9.0000	0.0000	0.0000	-2.530	4.8000	-4.8000	0	1.0000	2.0000	0
3.0000	1.0000	-27.000	0.0000	0.0000	0.0000	-6.180	12.0000	-10.8000	0	1.0000	3.0000	0
2.0000	1.0480	-7.5000	0	0	0	0	0	0	0	1.0000	4.0000	0
2.0000	1.0690	-19.000	0	0.0000	0.0000	0	0	0	0	1.0000	5.0000	0
2.0000	1.0680	-29.000	0	0.0000	0.0000	0	0.0000	-0.0000	0	1.0000	6.0000	0
2.0000	1.0630	-29.000	0	0.0000	0	0	0	0	0	1.0000	7.0000	0
2.0000	1.0530	-38.000	0.0000	12.000	1.5000	0	0.0000	-0.0000	0	1.0000	8.0000	0
2.0000	1.0610	-30.000	0	1.0500	0.3300	0	0.0000	0.0000	0	1.0000	9.0000	0
2.0000	1.0590	-27.000	0	2.000	0.3800	0	0	0	0	1.0000	10.0000	0
2.0000	1.0200	-34.000	0	4.4000	1.6000	0	0	0	0	1.0000	11.0000	0
2.0000	1.0360	-0.87000	0.0000	0.0000	0.0000	0	0.0000	-0.0000	0	1.0000	12.0000	0
2.0000	1.0420	-8.4000	0	0.7500	0.2500	0	0	0	0	1.0000	13.0000	0
2.0000	1.0320	-3.0000	0	4.5400	0.4800	0	0	0	0	1.0000	14.0000	0
2.0000	1.0090	-8.6000	0	0.0000	0.0000	0	0	0	0	1.0000	15.0000	0
2.0000	0.9920	-11.000	0	9.0000	3.0000	0	0	0	0	1.0000	16.0000	0
3.0000	1.0000	8.3500	7.0000	0.0000	0.0000	-2.170	6.8000	-8.8000	0	1.0000	17.0000	0
3.0000	1.0200	8.3200	2.5000	0.0000	0.0000	-0.853	1.4000	-1.4000	0	1.0000	18.0000	0
3.0000	1.0100	8.3200	3.5000	0.0000	0.0000	-1.460	2.8500	-3.6000	0	1.0000	19.0000	0
3.0000	1.0100	1.3200	2.0000	0.0000	0.0000	-2.470	8.4000	-12.000	0	1.0000	20.0000	0
2.0000	1.0340	3.0800	0	0	0	0	0	0	0	1.0000	21.0000	0
2.0000	1.0530	3.6400	0	0	0	0	0	0	0	1.0000	22.0000	0
2.0000	1.0450	2.4300	0	2.1400	0.7400	0	0	0	0	1.0000	23.0000	0
2.0000	1.0400	4.6200	0	0	0	0	0	0	0	1.0000	24.0000	0
2.0000	1.0450	-0.21000	0	0	0	0	0	0	0	1.0000	25.0000	0
3.0000	1.0200	2.15000	8.0000	0	0	-0.604	4.5000	-4.5000	0	1.0000	26.0000	0
2.0000	1.0290	-2.3000	0	0	0	0	0	0	0	1.0000	27.0000	0
2.0000	1.0030	-7.9000	0	7.0000	1.5000	0	0	0	0	1.0000	28.0000	0
1.0000	1.0300	0.0000	10.490	0.0000	0.0000	0.05281	8.0000	-8.0000	0	2.0000	29.0000	0
3.0000	1.0300	13.8000	11.500	0.0000	0.0000	0.4614	6.0000	-6.0000	0	2.0000	30.0000	0
3.0000	1.0300	6.5700	12.000	0.0000	0.0000	-1.570	5.3200	-4.0000	0	2.0000	31.0000	0
2.0000	1.0000	-25.0000	0	7.3540	1.9100	0	0	0	0	2.0000	32.0000	0
2.0000	1.0610	-6.30000	0	0.0000	0.0000	0	0	0	0	2.0000	33.0000	0
2.0000	0.9950	-17.0000	0	0.1340	0.042	0	0	0	0	2.0000	34.0000	0
2.0000	0.9990	4.23000	0	0.0000	0.0000	0	0	0	0	2.0000	35.0000	0
2.0000	0.9860	1.24000	0	1.5900	0.3600	0	0	0	0	2.0000	36.0000	0
2.0000	1.0150	5.08000	0	0.9400	0.1800	0	0	0	0	2.0000	37.0000	0
2.0000	1.0530	-0.10000	0	0.0000	0.0000	0	0	0	0	2.0000	38.0000	0
2.0000	1.0650	-23.0000	0	0	0	0	0	0	0	2.0000	39.0000	0

2.0000	1.0490	6.23000	0	0	0	0	0	0	0	2.0000	40.0000	0
2.0000	1.0560	7.46000	0	0.0000	0	0	0	0	0	2.0000	41.0000	0
2.0000	1.0280	8.37000	0	0.0000	0.0000	0	0	0	0	2.0000	42.0000	0
3.0000	1.0400	-3.20000	7.0000	0.0000	0.0000	-2.290	4.7500	-4.7500	0	2.0000	43.0000	0
3.0000	1.0300	-3.60000	6.0000	0.0000	0.0000	-2.050	4.6500	-5.1600	0	2.0000	44.0000	0
3.0000	1.0300	15.90000	7.0000	0	0	1.554	2.2000	-1.4800	0	2.0000	45.0000	0
3.0000	1.0300	10.3000	9.5000	0	0	0.1317	4.2000	-4.4000	0	2.0000	46.0000	0
2.0000	1.0610	-6.70000	0	0.0000	0.0000	0	0	0	0	2.0000	47.0000	0
2.0000	1.0000	-6.80000	0	2.3700	0.5900	0	0	0	0	2.0000	48.0000	0
2.0000	1.0710	-25.0000	0	0.0000	0	0	0	0	0	2.0000	49.0000	0
2.0000	1.0000	-27.0000	0	11.490	0.5360	0	0	0	0	2.0000	50.0000	0
2.0000	1.0860	-13.0000	0	0.0000	0.0000	0	0	0	0	2.0000	51.0000	0
2.0000	1.0570	-23.0000	0	0.0000	0.0000	0	0	0	1.0000	2.0000	52.0000	0
2.0000	1.0000	-25.0000	0	8.4470	4.6910	0	0	0	0	2.0000	53.0000	0
2.0000	1.0730	-20.0000	0	0.0000	0.0000	0	0	0	0	2.0000	54.0000	0
2.0000	1.0000	-22.0000	0	7.5560	0.5624	0	0	0	0	2.0000	55.0000	0
2.0000	1.0500	-22.0000	0	0.0000	0.0000	0	0	0	0	2.0000	56.0000	0
2.0000	1.0780	-8.70000	0	0.0000	0.0000	0	0	0	0	2.0000	57.0000	0
2.0000	1.0030	-27.0000	0	0.7000	0.0200	0	0	0	0	2.0000	58.0000	0
2.0000	1.0780	-10.0000	0	0.0000	0.0000	0	0	0	0	2.0000	59.0000	0
2.0000	1.0350	9.310000	0	0.0000	0.0000	0	0	0	0	2.0000	60.0000	0
2.0000	1.0610	2.530000	0	0.0000	0.0000	0	0	0	0	2.0000	61.0000	0
2.0000	1.0000	-25.0000	0	12.280	4.2500	0	0	0	0	2.0000	62.0000	0
2.0000	1.0590	-36.0000	0	0.0000	0.0000	0	0	0	0	2.0000	63.0000	0
2.0000	1.0560	-39.0000	0	1.1000	0.4300	0	0	0	0	2.0000	64.0000	0
2.0000	1.0000	4.010000	0	4.0300	1.2600	0	0	0	0	2.0000	65.0000	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

MATRIZ C

100.0000	20.0000	0.0000	0.01264	0.0000	1	1.0000
100.0000	101.0000	0.00172	0.0272	2.3140	0	0
100.0000	101.0000	0.00171	0.0270	2.3020	0	0
100.0000	210.0000	0.00209	0.02935	2.5460	0	0
100.0000	213.0000	0.00000	0.02357	0.0000	0	0
100.0000	535.0000	0.00153	0.0240	2.0380	0	0
101.0000	102.0000	0.00156	0.0246	2.0850	0	0
101.0000	103.0000	0.00152	0.0239	2.0260	0	0
102.0000	120.0000	0.00000	0.02403	0.0000	0	0
102.0000	1503.0000	0.00110	0.0191	1.6185	0	0

103.0000	123.0000	0.00000	0.02419	0.0000	0	0
104.0000	103.0000	0.00196	0.0310	2.6490	0	0
104.0000	1503.0000	0.00050	0.0082	0.6936	0	0
122.0000	48.0000	0.00000	0.00953	0.0000	0	0
122.0000	103.0000	0.00105	0.01619	1.3635	0	0
122.0000	103.0000	0.00105	0.01619	1.3635	0	0
210.0000	18.0000	0.0000	0.01000	0.0000	1	1.0000
210.0000	217.0000	0.0000	0.0172	0.0000	1	1.0000
210.0000	217.0000	0.0000	0.0172	0.0000	1	1.0000
210.0000	370.0000	0.00147	0.0232	1.966	0	0
233.0000	210.0000	0.0028	0.0399	3.5536	0	0
233.0000	320.0000	0.0027	0.0027	0.03870	0	0
234.0000	233.0000	0.0000	0.01113	0.0000	1	1.0000
234.0000	233.0000	0.0000	0.01000	0.0000	1	1.0000
320.0000	210.0000	0.00125	0.01937	1.4996	0	0
320.0000	300.0000	0.00000	0.013567	0.0000	1	1.0000
320.0000	360.0000	0.00082	0.01256	0.9899	0	0
325.0000	301.0000	0.00000	0.0351	0.0000	1	1.0000
325.0000	326.0000	0.00000	0.0216	0	1	1.0000
325.0000	326.0000	0.00000	0.0216	0	1	1.0000
325.0000	360.0000	0.001	0.01519	1.1967	0	0
325.0000	370.0000	0.0028	0.0484	4.1950	0	0
360.0000	302.0000	0.0000	0.019367	0	1	1.0000
370.0000	303.0000	0.0000	0.0141	0.000	1	1.0000
370.0000	535.0000	0.000931	0.013758		0	0
535.0000	500.0000	0.00000	0.001025	0	1.0000	1.0000
536.0000	535.0000	0.00000	0.0142	0	1.0000	1.0430
814.0000	895.0000	0.00032	0.01146	0	1.0000	0.9503
814.0000	895.0000	0.00031	0.011651	0	1.0000	0.9503
824.0000	800.0000	0.00000	0.0112	0	1.0000	1.0240
824.0000	933.0000	0.0001	0.00124	0.15204	0	0
824.0000	933.0000	0.0001	0.00126	0.15428	0	0
834.0000	934.0000	0.02444	0.12652	0.21706	0	0
839.0000	840.0000	0.00000	0.0664	0	1.0000	1.0000
839.0000	840.0000	0.00000	0.0629	0	1.0000	1.0000
839.0000	898.0000	0.01130	0.0699	0.12617	0	0
839.0000	1047.0000	0.01220	0.0769	0.1381	0	0
839.0000	2458.0000	0.00220	0.0109	0.018601	0	0
839.0000	2458.0000	0.00170	0.0103	0.020537	0	0
856.0000	810.0000	0.00000	0.0105	0.0000	1.0000	1.0000
856.0000	933.0000	0.00052	0.00654	0.80493	0	0
856.0000	1060.0000	0.00056	0.00697	0.85746	0	0
895.0000	122.0000	0.00308	0.03958	4.44840	0	0
895.0000	122.0000	0.00308	0.03958	4.44840	0	0

896.0000	897.0000	0.00050	0.0073	0.78060	0	0
897.0000	808.0000	0.00000	0.0102	0	1.0000	1.0240
898.0000	848.0000	0.00000	0.0636	0	1.0000	1.0000
898.0000	1047.0000	0.00150	0.0089	0.016317	0	0
933.0000	895.0000	0.00200	0.0255	3.12720	0	0
933.0000	955.0000	0.00162	0.02048	2.5017	0	0
933.0000	959.0000	0.00200	0.0269	3.3640	0	0
934.0000	933.0000	0.00031	0.01207	0	1.0000	0.9477
934.0000	1047.0000	0.03045	0.15738	0.27123	0	0
934.0000	1047.0000	0.03041	0.15718	0.27089	0	0
938.0000	955.0000	0.002556	0.029224	3.60400	0	0
938.0000	959.0000	0.001270	0.01603	1.95890	0	0
939.0000	938.0000	0.000310	0.0115	0	1.0000	0.9360
939.0000	938.0000	0.000320	0.01163	0	1.0000	0.9360
939.0000	938.0000	0.000000	0.01277	0	1.0000	0.9360
939.0000	1015.0000	0.01271	0.06562	0.11305	0	0
939.0000	1015.0000	0.01283	0.06564	0.11522	0	0
955.0000	964.0000	0.001877	0.023467	2.87240	0	0
959.0000	895.0000	0.000500	0.004400	0.47580	1.0000	0.9580
960.0000	834.0000	0.022111	0.11475	0.19687	0	0
960.0000	959.0000	0.000320	0.01163	0	1.0000	0.9744
960.0000	959.0000	0.000310	0.01166	0	1.0000	0.9744
960.0000	1015.0000	0.018920	0.09776	0.16845	0	0
960.0000	1015.0000	0.018950	0.09704	0.17029	0	0
964.0000	976.0000	0.0007330	0.009164	1.12170	0	0
965.0000	964.0000	0.0002000	0.01211	0	1.0000	0.9349
965.0000	964.0000	0.0002000	0.01233	0	1.0000	0.9349
976.0000	995.0000	0.0028200	0.03852	4.93700	0	0
995.0000	904.0000	0.0001233	0.015383	0	1.0000	1.0000
995.0000	964.0000	0.0016430	0.030339	3.54880	0	0
995.0000	1030.0000	0.0007300	0.00920	1.12260	0	0
995.0000	1060.0000	0.0017200	0.02170	2.65160	0	0
1030.0000	915.0000	0	0.020655	0	1.0000	1.0000
1030.0000	955.0000	0.0004700	0.00590	0.71818	0	0
1047.0000	919.0000	0.0002425	0.017022	0	1.0000	1.0250
1060.0000	897.0000	0.0007600	0.01171	1.24580	0	0
1060.0000	925.0000	0.0001133	0.01515	0	1.0000	1.0240
1210.0000	976.0000	0.0003000	0.01219	0	1.0000	0.9681
1210.0000	976.0000	0.0003900	0.01138	0	1.0000	0.9681
1210.0000	976.0000	0.0003600	0.01217	0	1.0000	0.9681
1503.0000	1504.0000	0	0.05200	0	1.0000	0.9824
2458.0000	896.0000	0	0.01270	0	1.0000	0.9654
0	0	0	0	0	0	0