UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA PROJETO DE GRADUAÇÃO



MONIQUE ROSALIA DE PAULA

ALOCAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA PARA REDUÇÃO DE PERDAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO BUSCA EXAUSTIVA E ALGORITMO GENÉTICO

VITÓRIA – ES DEZEMBRO/2018

MONIQUE ROSALIA DE PAULA

ALOCAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA PARA REDUÇÃO DE PERDAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO BUSCA EXAUSTIVA E ALGORITMO GENÉTICO

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Monique Rosalia de Paula**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação Orientador: Msc. Adan Lúcio Pereira

VITÓRIA – ES DEZEMBRO/2018

MONIQUE ROSALIA DE PAULA

ALOCAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA PARA REDUÇÃO DE PERDAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO BUSCA EXAUSTIVA E ALGORITMO GENÉTICO

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Monique Rosalia de Paula**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 12 de Dezembro de 2018.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação Universidade Federal do Espírito Santo Orientador

Msc. Adan Lúcio Pereira Universidade Federal do Espírito Santo Orientador

Prof. Dr. Augusto César Rueda Medina Universidade Federal do Espírito Santo Examinador

Msc. Daniel Carletti Universidade Federal do Espírito Santo Examinador

Dedico esse trabalho à minha Tia Francisca (in Memoriam).

Agradeço ao Universo, pela oportunidade de entrada (e permanência) na Universidade e no curso os quais eu almejava.

Aos meus pais, Marila e Altemiro, por todo o cuidado, amor e generosidade ao longo de minha vida, sem os quais eu não conseguiria alcançar mais essa etapa. Ao meu irmão Robinson, pela amizade e suporte ao longo da jornada.

Agradeço aos meus orientadores, professores Lucas e Adan, por todo o direcionamento, auxílio e orientações ao longo do desenvolvimento do trabalho.

A todos os professores (UFES, IFES, Escola Laranjeiras...) que contribuíram para que esse sonho pudesse tornar-se realidade, minha eterna gratidão!

•

RESUMO

Tendo em vista a importância da constante análise e busca pelo melhor modo de operação do Sistema Elétrico de Potência (SEP) torna-se indispensável consolidar conceitos que auxiliam no processo de otimização de tais sistemas. O presente trabalho possui enfoque em sistemas de distribuição, que são componentes do SEP. Objetiva-se utilizar metodologia para redução de perdas técnicas na rede de distribuição através de avaliação do comportamento das grandezas elétricas do sistema perante a inserção de Geração Distribuída (GD) ao longo da rede. Para escolher os melhores pontos para alocação de GD deve ser definido um meio de busca das soluções e por isso são apresentadas ao longo do texto duas metodologias para obtenção do posicionamento do gerador que minimiza perdas. As estratégias consistem na técnica de Busca Exaustiva e o uso de recurso da metaheurística Algoritmo Genético. Serão apresentadas formas de modelagem dos principais componentes encontrados nesse tipo de rede (capacitores, cargas de consumidores, linhas e geradores). Por fim são demonstrados, por meio de comparações, os resultados referentes ao uso das metodologias empregadas. Palavras-chave: Perdas técnicas. Fluxo de Potência. Busca Exaustiva. Algoritmos Genéticos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de uma linha de distribuição	19
Figura 2 – Fluxograma do Algoritmo de Varredura Direta e Reversa	23
Figura 3 – Pseudocódigo para Busca Exaustiva de soluções	30
Figura 4 – Exemplo de representação de um cromossomo para AG	32
Figura 5 – Exemplo de representação de um cruzamento	33
Figura 6 – Estrutura básica do funcionamento de um Algoritmo Genético	34
Figura 7 – Função exemplo para Algoritmo Genético	35
Figura 8 – População inicial da função exemplo Algoritmo Genético	36
Figura 9 – Evolução das populações iniciais	37
Figura 10 – Evolução próximas gerações em direção ao máximo global	38
Figura 11 – Soluções finais do problema exemplo	39
Figura 12 – Rede 13 barras IEEE	41
Figura 13 – Rede 13 barras IEEE simplificada	44

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Balanço de eletricidade no Brasil em 2017	14
Gráfico 2 – Módulos de tensão para o caso inicial da rede de 13 barras (antes das alocaçõ	ões
de GD)	45
Gráfico 3 – Módulos de tensão para rede de 13 barras após alocação de 1 GD	48
Gráfico 4 - Módulos de tensão para rede de 13 barras após alocação de 2 GDs	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Faixa de classificação de tensões em regime permanente para ponto de	conexão
em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV	
Quadro 2 – Vantagens Algoritmos Genéticos	
Quadro 3 – Estado base da rede quanto ao nível de perdas técnicas	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Erro percentual código desenvolvido	43
Tabela 2 – Perda total de potência ativa na rede após alocação de 1 unidade de GD	46
Tabela 3 – Melhores barras para alocação de GD via Busca Exaustiva	47
Tabela 4 – Resultados de Alocação GD pelo código de Algoritmo Genético	47
Tabela 5 – Alocação de 2 unidades de GDs via Busca Exaustiva Rede 13 barras	49
Tabela 6 – Resultados de alocação de 2 unidades de GD por AG	50
Tabela 7 – Tempo médio de execução dos Algoritmos	52
Tabela 8 – Caracterização das cargas concentradas da Rede 13 barras	56
Tabela 9 – Caracterização das cargas uniformemente distribuída de Rede 13 barras	56
Tabela 10 – Dados dos capacitores da Rede de 13 barras	56
Tabela 11 – Caracterização dos trechos da Rede de 13 barras	57
Tabela 12 – Configurações das linhas aéreas	57
Tabela 13 – Configuração das linhas subterrâneas	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	Algoritmos Genéticos
BEN	Balanço Energético Nacional
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
GD	Geração Distribuída
Ι	Corrente elétrica
pu	Por unidade
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência
V	Tensão elétrica
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

LISTA DE SÍMBOLOS

1	Comprimento de uma linha (km)
S _{NF}	Potência complexa nominal (kVA)
P_{NF}	Potência ativa nominal (kW)
Q_{NF}	Potência reativa nominal (kvar)
I _{NF}	Corrente nominal (A)
Z _{cte}	Impedância constante (Ω)
V_{NF}	Tensão nominal (kV)
I_F	Corrente elétrica (A)
V_F	Tensão elétrica (V)
Φ	Defasagem angular (°)
Φ_1	Fase (ângulo) da uma tensão V_{NF}
Φ_2	Fase (ângulo) da uma tensão V_F
kp	Porcentagem da carga representada pelo modelo de potência constante
ki	Porcentagem da carga representada pelo modelo de corrente constante
kz	Porcentagem da carga representada pelo modelo de impedância constante
If	Representação de geração distribuída (corrente do gerador)
Perdas	Valor de potência ativa ao longo da rede
PSE	Potência injetada na rede pela subestação (alimentação principal)
Pcarga(i)	Potência absorvida pela i-ésima carga conectada na i-ésima barra
QSE	Potência reativa injetada na rede pela subestação na rede
Pelem(i)	Potência ativa injetada na rede pela i-ésima unidade de GD
Qelem(i)	Potência reativa injetada na rede pela i-ésima unidade de GD
Pcarga(i)	Potência ativa absorvida pela i-ésima carga conectada ao sistema
Qcarga(i)	Potência reativa absorvida pela i-ésima carga conectada ao sistema
Perdas(p)	Perdas técnicas do sistema referentes às dissipações (perda ativa)
Perdas(q)	Potência reativa armazenada no sistema pelos elementos reativos.
ntrechos	Número total de trechos na rede
$r_{(i)}$	Resistência associada ao i-ésimo trecho do sistema;
$I_{(i)}$	Corrente elétrica associada ao i-ésimo trecho do sistema;
V_k	Tensão na k-ésima barra do sistema;
nВ	Número de barras conectadas ao sistema.

ngds Número de geradores distribuídos inseridos no sistema.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
	1.1 Apresentação	14
	1.2 Objetivos	15
	1.2.1 Objetivo geral	16
	1.2.2 Objetivos Específicos	16
	1.3 Estrutura do trabalho	16
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
	2.1 Representação do Sistema	18
	2.2 Linhas de transmissão de energia	18
	2.3 Equipamentos da rede	19
	2.3.1 Cargas	20
	2.3.2 Bancos de capacitores	22
	2.4 Fluxo de Potência	22
	2.4.1 Varredura direta e reversa	23
	2.5 Geração Distribuída	24
3	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E BUSCA DE SOLUÇÕES	26
	3.1 Formulação do problema	26
	3.2 Busca Exaustiva	29
	3.3 Algoritmos Genéticos	30
4	TESTES E RESULTADOS	41
	4.1 Apresentação da rede utilizada	41
	4.1.1 Rede de distribuição de 13 barras	41
	4.2 Sumário de testes	42
	4.3 Resultados	42
5	CONCLUSÕES	51
	5.1 Trabalhos futuros	52
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
A	NEXO A	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

O uso de energia elétrica está presente no cotidiano, em ambiente residencial, comercial, hospitalar, escolar, industrial e até mesmo em regiões rurais. Utiliza-se eletricidade para que os meios de comunicação possam funcionar, para iluminação de vias públicas, nos sistemas de irrigação automáticos, nos processos industriais de forma geral e assim por diante.

Anualmente, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) apresenta um relatório com dados referentes ao setor energético brasileiro. Alguns destaques são a energia total gerada, seus processos de transformação, além de informações sobre o consumo. O perfil de geração de energia elétrica e seu uso também são apresentados. No Gráfico 1, está ilustrado o balanço de energia elétrica no Brasil para o ano de 2017. Os dados utilizados no gráfico foram extraídos do relatório anual de balanço energético da Empresa de Pesquisa Energética.





Percebe-se que, em 2017, o patamar de perdas (técnicas e comerciais) foi de 15,7%. Esse valor corresponde a 98,1 TWh, sendo que o consumo residencial de eletricidade em 2017 foi de 133,932 TWh, ou seja, o valor gasto com perdas poderiam suprir 73,246% do consumo elétrico residencial brasileiro (EPE, 2018). Vale ressaltar que esse número engloba tanto as

Fonte: Produção do próprio autor.

perdas técnicas quanto as perdas não técnicas (oriundas de furtos ou medição inadequada, por exemplo). Pode-se, entretanto, analisar perdas especificamente no caso de distribuição.

As concessionárias de energia comumente disponibilizam relatórios referentes aos seus respectivos balanços energéticos. A empresa EDP São Paulo apresenta que em 2017 o percentual de perdas totais na rede de distribuição consistiu em 8,7% em relação à energia requerida do sistema (EDP, 2018). Esse valor totaliza 878 GWh da energia requerida pelos clientes da distribuidora. Considerando a quantidade de distribuidoras totais do país, pode-se estimar um número muito elevado de energia perdida.

Percebe-se que as perdas desempenham um papel significativo no que concerne ao consumo elétrico. Dessa forma, justifica-se a busca de alternativas que auxiliem no processo de diminuição de tais perdas, tendo em vista que essa redução traz benefícios econômicos (reduzem custos que são entregues aos clientes nas faturas) e contribuem para o uso consciente de energia elétrica, tendo em vista que os recursos para geração de eletricidade são escassos.

Uma forma de auxiliar no processo de diminuição de perdas está vinculada com a aproximação da geração e o centro de consumo (FIGUEIREDO, 2012). Tal proximidade pode ser efetuada por meio da inserção de unidades de geração distribuída (GD) ao longo da rede de distribuição. Existem diversos benefícios no emprego de tal tecnologia em sistemas de distribuição, tais como melhoria no perfil de tensão da rede, aumento da capacidade de distribuição e transmissão, melhora no fator de potência e redução de perdas (K.U.Leuven - Energy Institute, 2003).

1.2 Objetivos

No presente trabalho, será avaliado o efeito da GD na distribuição de energia elétrica, para redução de perdas. Tal procedimento será realizado por meio da busca do ponto rede que traz melhores benefícios ao sistema. Durante a procura do local para instalação de GD também será efetuado dimensionamento de potência de tal(is) unidade(s) geradora(s).

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo central do projeto consiste no desenvolvimento de rotina computacional, em linguagem MATLAB, para simular a estratégia escolhida para redução de perdas técnicas em sistemas de distribuição.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como especificidade, neste projeto espera-se:

- 1. Elaborar, na plataforma MATLAB, código para obtenção do fluxo de potência em sistemas de distribuição e verificar sua validade;
- 2. Modelar o problema para resolução computacional;
- Desenvolvimento das rotinas, em MATLAB, para solucionar a questão. As rotinas serão apresentadas posteriormente, mas consistem na alocação de Geração Distribuída por meio de Busca Exaustiva e Algoritmo Genético.

1.3 Estrutura do trabalho

A monografia foi organizada com a finalidade de apresentar os principais tópicos para o entendimento do projeto em cinco capítulos. Após apresentação ao tema no Capítulo 1, os capítulos 2 e 3 efetuam revisão da bibliografia necessária para a elaboração e desenvolvimento do projeto de graduação. O Capítulo 2 trata da representação do sistema, equacionando os modelos adotados. O algoritmo empregado para determinação das tensões e correntes ao longo da rede também é discutido.

No Capítulo 3 formula-se o problema a ser resolvido, apontando as restrições e tópicos relevantes para que o enunciado possa ser elaborado. Também, são apresentadas as técnicas adotadas para que as buscas de solução do problema possam ser executadas. Tais procuras consistem em estratégias que visam localizar soluções para o problema sem esforço computacional maximizado.

Em seguida, no Capítulo 4 são apresentadas as redes nas quais os códigos desenvolvidos serão aplicados. Em seguida, listam-se os testes adotados para o projeto de graduação. Por fim, apresentam-se os resultados.

O Capítulo 5 trata das conclusões obtidas por meio do desenvolvimento do trabalho. As principais informações sobre resultados são recapituladas e as soluções são discutidas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Representação do Sistema

Para a análise do efeito de alocação de Geração Distribuída em um sistema de distribuição, a abordagem adotada consiste em simulação computacional. A modelagem das redes, juntamente com todos os componentes associados, foi desenvolvida na plataforma MATLAB.

Os sistemas estudados (compostos por cargas, linhas e equipamentos) devem ser descritos por modelos simplificados de seu funcionamento, para que seja possível efetuar análises. Todavia, é importante que as modelagens, dentro de uma tolerância estabelecida, representem adequadamente o sistema.

Para que essa representação seja bem selecionada, a literatura técnica foi consultada. A seguir serão ilustrados os modelos comumente adotados, cujos equacionamentos trazem representatividade adequada das situações reais do sistema.

2.2 Linhas de transmissão de energia

As linhas de transmissão são as responsáveis pelo transporte de energia entre distintos pontos do sistema, tendo em vista que é por meio delas que ocorre fluxo de potência elétrica. Tipicamente, na distribuição de energia elétrica, o modelo adotado para representação é função dos seguintes parâmetros: resistência, indutância, capacitância e condutância (GRAINGER; STEVERSON, 1994).

Os parâmetros de resistência e indutância juntos são representados como uma impedância série da linha de distribuição. Já os de capacitância e condutância são inclusos paralelamente às estruturas das linhas, como susceptância paralelas aos cabos elétricos. Observa-se, entretanto, que a condutância é muito pequena e por isso é desprezada da representação (MONTENEZZO, 2016). Linhas de distribuição possuem tipicamente níveis de tensão muito menores quando equiparados aos de transmissão, por exemplo. A influência das capacitâncias desempenha papel pouco expressivo nos cálculos e, por essa razão, passa a não ser contabilizado na modelagem (MONTENEZZO, 2016).

Na Figura 1, ilustra-se a representação de uma linha de distribuição com as simplificações anteriormente mencionadas.



Figura 1 - Estrutura de uma linha de distribuição

Fonte: Kersting, (2002 modificado pelo autor).

Na Figura 1 são exibidos os parâmetros série de cada fase. Observa-se que a maneira de efetuar quantificação dos componentes da linha possui relação com o método das imagens, utilizado em eletromagnetismo. Tendo em vista que o escopo do trabalho visa apenas utilizar esses parâmetros o equacionamento não será apresentado. Todavia, a formulação matemática pode ser obtida em (GRAINGER; STEVERSON, 1994).

2.3 Equipamentos da rede

Uma rede típica de distribuição é constituída de subestação e alimentadores (KERSTING, 2002). Alguns dos principais equipamentos encontrados ao longo dos alimentadores são transformadores, bancos de capacitores e as cargas.

Com a finalidade de representar os elementos citados durante o processo de desenvolvimento do trabalho os modelos, comumente utilizados na literatura, foram selecionados e serão apresentados a seguir.

2.3.1 Cargas

A conceituação de carga tem relação com o tipo de análise a ser realizada (KERSTING, 2002). Com a finalidade de representa-las para o estudo de fluxo de potência, as cargas serão especificadas por meio de suas potências complexas.

As grandezas associadas com cada carga consistem em corrente (I) e tensão elétrica (V). Com a finalidade de determinar a primeira delas, torna-se necessário a utilização da tensão, que também é desconhecida. Para lidar com a situação, utiliza-se o recurso de cálculo através de processo iterativo (KERSTING, 2002). O algoritmo empregado para a obtenção das tensões e correntes será explicado posteriormente.

Em redes de distribuição, as cargas podem ser trifásicas, bifásicas ou monofásicas. As ligações ao sistema podem ser através de conexão em delta ou estrela. Cada carga pode ser representada, para o fluxo de potência, através dos modelos descritos a seguir.

1) Potência Constante: Nessa situação a potência complexa é invariante com o valor de tensão de alimentação da carga em análise (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA; 2005). A Equação (1) descreve a forma geral de potência complexa da carga, na qual S_{NF} representa o valor nominal. Por outro lado, as Equações (2) e (3) referem-se respectivamente aos valores de tensão e corrente na carga, sendo que (2) especifica um valor de operação (que pode ser distinto do valor nominal).

$$S_{NF} = |S_{NF}| \angle \Phi = P_{NF} + jQ_{NF} \tag{1}$$

$$V_F = |V_F| \angle \Phi_1 \tag{2}$$

$$I_{F} = \frac{S_{NF}^{*}}{V_{F}^{*}} = \frac{|S_{NF}|}{|V_{F}|} \angle \Phi_{1} - \Phi$$
(3)

2) Corrente Constante: Essa modelagem inclui cargas nas quais o valor do módulo da corrente e a diferença angular entre tensão e corrente permanece constante, ou seja, o fator de potência não muda (KERSTING, 2002). Nas Equações (4), (5), (6) são expressos os valores nominais de potência complexa, tensão e corrente, respectivamente. Em seguida, a Equação (7) define a tensão nos terminais da carga em

um ponto de operação diferente do valor nominal. Utilizando o conceito da modelagem por corrente constante, a Equação (8) apresenta a corrente no ponto de operação da tensão, da Equação (7). A Equação (9) demonstra que o valor do fator de potência foi mantido (ângulo da potência complexa).

$$S_{NF} = |S_{NF}| \angle \Phi \tag{4}$$

$$V_{NF} = |V_{NF}| \angle \Phi_1 \tag{5}$$

$$I_{NF} = \frac{S_{NF}^{*}}{V_{NF}^{*}} = |I_{NF}| \angle \Phi_{1} - \Phi$$
(6)

$$V_F = |V_F| \angle \Phi_2 \tag{7}$$

$$I_F = |I_{NF}| \angle \Phi_2 - \Phi = \frac{S_{NF}^*}{|V_{NF}|} \frac{|V_F|}{|V_F|^*}$$
(8)

$$S_F = V_F I_F^* = |S_F| \angle (\Phi_2 - (\Phi_2 - \Phi)) = |S_F| \angle \Phi$$
(9)

3) Impedância Constante: Nestas cargas a impedância é constante com as variações de tensão (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA; 2005). Utilizando as Equações (4) e (5), o valor da impedância pode ser calculado como mostrado na Equação (10):

$$Z_{cte} = \frac{|V_{NF}|^2}{S_{NF}^*} = \frac{|V_{NF}| \angle \Phi}{|S_{NF}|}$$
(10)

Dado um ponto de operação tal como o dado pela Equação (7) e utilizando a Equação (10), a corrente na carga é dada por (11):

$$I_F = \frac{V_F}{Z_{cte}} = \frac{S_{NF}^{*}}{|V_{NF}|^2} V_F$$
(11)

Observa-se que as cargas também podem ser representadas por uma combinação dos modelos associando um índice de porcentagem correspondente a cada uma das correntes das três modelagens apresentadas (KERSTING, 2002), como apresentado na Equação (12). A soma

das componentes percentuais das três correntes deve resultar em cem por cento, conforme a Equação (13).

$$I_F = kp \frac{S_{NF}^*}{V_F^*} + ki \frac{S_{NF}^*}{|V_{NF}|} \frac{|V_F|}{V_F^*} + kz \frac{S_{NF}^*}{|V_{NF}|^2} V_F$$
(12)

$$kp + ki + kz = 100\%$$
 (13)

2.3.2 Bancos de capacitores

Os bancos de capacitores conectados à rede podem ser modelados como susceptância constante, ou seja, utilizando o modelo de carga de impedância constante (KERSTING, 2002). Portanto, o modelo de um banco de capacitor conectado ao sistema pode ser representado pela Equação (11).

2.4 Fluxo de Potência

O fluxo de potência consiste na resolução do circuito representativo do sistema elétrico, ou parte dele, de modo a determinar os níveis de tensão e corrente em todos os pontos da estrutura em análise (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA; 2005).

A partir dos resultados obtidos podem ser calculadas as potências ativa e reativa por trecho e em seguida feito o balanço energético da rede (para obtenção do nível de perdas técnicas).

Deve ser ressaltado que o fluxo de potência descreve o estado da rede em determinado momento, de forma que caso haja mudanças ou alterações em níveis de tensão em qualquer barramento do circuito o fluxo de potência deve ser novamente calculado.

A importância dessa técnica pode ser constatada observando que os resultados obtidos fornecem subsídio pra diversas análises, tais como:

- A informação de tensão por ponto permite a verificação quanto à adequação em relação a normas (ANEEL) (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA; 2005);
- Com os valores de corrente calculados por trecho torna-se possível a verificação do percentual de carregamento dos alimentadores presentes na rede, de forma que as

restrições térmicas dos condutores podem ser monitoradas para que não sejam ultrapassadas (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA; 2005);

3. Determinação de perdas técnicas do sistema.

Existem diversos algoritmos para calcular o fluxo de potência em sistemas, tais como: método de Gauss-Seidel, Newton-Raphson (versão tradicional e suas variações, para aceleração de convergência), entre outros. Contudo, cada método apresenta-se mais ou menos eficiente de acordo com o tipo de problema.

O algoritmo mais comumente empregado, para a topologia radial da distribuição, é o método de varredura direta e reversa que será mostrado na próxima subseção.

2.4.1 Varredura direta e reversa

O método para solução do fluxo de potência mais comumente aplicado consiste no Algoritmo de Varredura Direta e Reversa, cujo fluxograma pode ser visualizado da Figura 2.



Figura 2 - Fluxograma do Algoritmo de Varredura Direta e Reversa

Fonte: Produção do próprio autor.

O procedimento tem inicio quando as barras de tensão recebem valor inicial, tipicamente de 1 pu (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA; 2005). Em seguida, com as informações sobre a

modelagem das cargas, são calculadas as correntes referentes a cada elemento (utilizando modelos anteriormente apresentados).

Após cálculo de correntes nos componentes, o procedimento é continuado com o cálculo das correntes ao longo dos trechos. A etapa é realizada através das somas das correntes, observando a lei de Kirchhoff das correntes. Ao término da etapa de cálculo de correntes por trecho, a próxima fase consiste no cálculo das quedas de tensão nos mesmos trechos, usando a informação das impedâncias das linhas e as correntes por trecho.

A penúltima etapa consiste na atualização das barras, que é feita através do resultado das quedas calculadas anteriormente. A modificação da tensão nas barras é feita por meio da análise iniciada na "subestação" da rede, calculando as novas tensões de barras através da diferença entre a tensão na iteração anterior (que na primeira iteração possui valor de 1pu) e as quedas calculadas.

Com as barras atualizadas, o processo atinge a última etapa, que consiste na verificação de uma tolerância pré-estabelecida. Se a diferença entre a tensão de cada barra na iteração vigente e a tensão de cada barra na iteração anterior for menor que a tolerância, o processo convergiu. Caso contrário, se alguma barra estiver com diferença superior ao valor pré-estabelecido, então o procedimento descrito, iniciando-se pelo cálculo de corrente nos elementos é repetido até que haja convergência para o sistema.

2.5 Geração Distribuída

Existem diversos conceitos para a Geração Distribuída. Podem ser entendidas como unidades responsáveis por geração, isto é, conversão de alguma forma de energia em eletricidade. Sua definição pode ser realizada em termos de suas capacidades de geração, comumente menores que a geração tradicional, como termelétricas e hidroelétricas (INEE, 2010). Além disso, a vantagem principal reside na possibilidade de instalação desses geradores em ambientes urbanos.

Alguns exemplos de tecnologias empregadas no contexto de Geração Distribuída consistem na geração fotovoltaica, turbinas eólicas e pequenas hidrelétricas (Rumão, 2017).

Este trabalho não visa apresentar a vastidão de fontes que podem ser aplicadas ao longo do sistema ou os procedimentos empregados no processo de dimensionamento para que uma quantia de potência demandada seja atendida. No entanto, espera-se apresentar o gerador como um modelo responsável por fornecer potência ativa, descrevendo-o em terminologia matemática.

A representação adotada para o gerador baseia-se no modelo de potência constante com a tensão, apresentado em seções anteriores. Logo, o gerador é percebido como carga de potência constante pela representação computacional. As Equações (14) e (15) apresentam a formulação empregada.

$$If = (-1)\frac{S_{NF}^{*}}{V_{F}^{*}} = \frac{(-P_{NF} - jQ_{NF})^{*}}{V_{F}^{*}}$$
(14)

$$If = \frac{-P_{NF}}{V_F^*} \tag{15}$$

O diferencial da modelagem de GD está vinculado com a especificação de que a potência a ela associada é de fornecimento e não de absorção. Essa mudança se expressa por meio de sinal negativo na expressão de corrente para o gerador.

3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E BUSCA DE SOLUÇÕES

3.1 Formulação do problema

Existem diversas formas de buscar a solução para um problema. A escolha de um método de solução está vinculada ao nível de conhecimento sobre o enunciado. A formulação de um problema de otimização (problema no qual deseja-se obter o valor ótimo de determinada grandeza) depende das variáveis envolvidas, das restrições referentes ao seu domínio, da função de avaliação e das incertezas a ele associadas (KAGAN, N. et al, 2009). De acordo com maneira adotada de representar o problema, uma técnica de solução pode ser mais apropriada que outra.

O problema de minimização de perdas elétricas pode ser formulado em etapas. A primeira parte consiste no equacionamento da função objetivo, que no contexto em observação consiste na função representativa das perdas do sistema. As perdas técnicas a serem minimizadas podem sem definidas pela Equação (16):

$$Perdas = PSE - \sum_{i=1}^{ncargas} Pcarga(i) - Pcomerciais$$
(16)

Na qual:

- *Perdas* valor de potência ativa ao longo da rede;
- *PSE* potência injetada na rede pela subestação (alimentação principal);
- *Pcarga*(*i*) potência absorvida pela i-ésima carga conectada na i-ésima barra;
- *ncargas* número de cargas (barras) na rede.
- Pcomerciais- perdas comerciais, que consistem nas perdas associadas a erros de medição e/ou furto de energia.

A próxima etapa consiste na definição das restrições que a minimização das perdas deve atender, isto é, o processo de redução de perdas não deve ser feito sem levar em consideração alguns critérios. Os aspectos considerados nesse trabalho são: Limites de tensão: esses valores são estabelecidos pela ANEEL, nos procedimentos de distribuição de energia elétrica, Módulo 8 (ANEEL, 2018). Conforme apresentado no Quadro 1, os módulos de tensão em cada um dos pontos de entrega devem estar dentro de um intervalo normatizado. Tais critérios objetivam estabelecer um padrão de qualidade para a energia elétrica entregue ao consumidor.

Quadro 1 – Faixa de classificação de tensões em regime permanente para ponto de conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV

Tensão de Atendimento (TA)Faixa de Variação da Tensão de Leitura (T	
	Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \le TL \le 1,05TR$
Precária	$0,90TR \le TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR \ ou \ TL > 1,05TR$

Fonte: ANEEL, (2018).

Balanço de Potência: Esse critério aponta que a somatória das potências, em seus valores líquidos, deve ser nula, tanto para o caso de potência ativa quanto no caso de potência reativa, exibidos nas Equações 17 e 18.

$$PSE + \sum_{i=1}^{ngds} Pelem(i) - \sum_{i=1}^{ncargas} Pcarga(i) - Perdas(p) = 0$$
(17)

$$QSE + \sum_{i=1}^{ngds} Qelem(i) - \sum_{i=1}^{ncargas} Qcarga(i) - Perdas(q) = 0$$
(18)

Nas quais:

- PSE e QSE potência ativa e reativa, respectivamente, injetadas na rede pela subestação na rede;
- Pelem(i) e Qelem(i) potência ativa e reativa, respectivamente, injetadas na rede pela i-ésima unidade de elemento inserido na rede para minimizar perdas elétricas. Tal elemento pode ser uma unidade de gerador distribuído, por exemplo.
- *Pcarga*(*i*) e *Qcarga*(*i*) potência ativa e reativa, respectivamente, absorvidas pelas cargas conectadas ao sistema;

- Perdas(p) e Perdas(q) perdas técnicas do sistema referentes às dissipações (perda ativa) e potência reativa armazenada no sistema pelos elementos capacitivos e indutivos.
- *ngds* número de GDs inseridos no sistema.

Após definição do problema a ser solucionado levantam-se questionamentos sobre a formulação da resposta. Além da maneira metodológica para atingir tal resultado, também devem ser definidos os tipos de dados esperados como solução para o problema.

Conforme apresentado pelas equações de balanço de potência, deseja-se efetuar inserção de elementos que auxiliam no processo de redução de perdas. Independente da natureza de tais elementos (sejam eles geração distribuída ou banco de capacitores, por exemplo) a solução do problema terá duas características básicas:

- Barra de alocação Posição de alocação do elemento, que consiste em uma das barras da rede de distribuição;
- Valor dimensionado Valor referente às caracterizações das grandezas nominais do elemento (potência elétrica).

Após análises, temos a seguir a formulação completa da função objetivo empregada no trabalho, representada pelas Equações de 19 a 22:

min FO = Perdas =
$$\sum_{i=1}^{ntrechos} r_{(i)} |I_{(i)}|^2$$
 (19)

Sujeito a:
$$0.93TR \le |V_k| \le 1.05TR, \quad \forall k \in [1, 2 ... nB]$$
 (20)

$$PSE + \sum_{i=1}^{ngds} Pelem(i) - \sum_{i=1}^{ncargas} Pcarga(i) - Perdas(p) = 0$$
(21)

$$QSE + \sum_{i=1}^{ngds} Qelem(i) - \sum_{i=1}^{ncargas} Qcarga(i) - Perdas(q) = 0$$
⁽²²⁾

Nas Equações de número 19 a 22, os seguintes parâmetros são utilizados:

- ntrechos número total de trechos na rede, consiste nas estruturas que ligam os barramentos;
- $r_{(i)}$ resistência associada ao i-ésimo trecho do sistema;
- $I_{(i)}$ corrente elétrica associada ao i-ésimo trecho do sistema;
- V_k tensão na k-ésima barra do sistema;
- nB número de barras conectadas ao sistema.

Sendo que as equações 21 e 22 são cópias das Equações 17 e 18.

As metodologias adotadas para obtenção de solução, caracterizada da forma citada anteriormente, serão apresentadas nas próximas seções.

3.2 Busca Exaustiva

A estratégia consiste na análise de todas as soluções possíveis para o problema e, em seguida, obtenção da melhor resposta de acordo com os critérios estabelecidos. Para o estudo de caso em andamento os critérios adotados estão vinculados com a minimização de perdas respeitando as restrições normativas e técnicas dos sistemas.

Na Figura 3, apresenta-se um pseudocódigo que detalha a ação da metodologia de busca exaustiva. O procedimento descrito na figura é executado até que todas as barras tenham sido avaliadas.

Após a obtenção do estado da rede (valores de tensão e corrente em todos os pontos) analisase qual alocação retorna melhor resposta, isto é, menor perda sem violação das restrições. Seleciona-se como solução a barra na qual houve alocação resultando na melhor resposta e o valor dimensionado para potência do elemento inserido. A potência é avaliada através de um vetor contendo valores possíveis de serem atribuídos aos elementos. Observa-se que o melhor valor também é função do nível de perdas na rede. Figura 3 - Pseudocódigo para Busca Exaustiva de soluções

```
INICIO:

Gerar vetor com possíveis potências para elemento : vetor_potencia;

in_for Para m=1 até m=tamanho(vetor_potencia)

potencia_elem=vetor_potencia(m);

in_rep Enquanto (cont≠nB)

Faça:

1. Alocar elemento potencia_elem na barra i;

2. Executar fluxo de potência;

3. Armazenar estado do sistema após passo 2;

4. cont=cont+1;

voltar a in_rep;

Voltar a in_for;

Comparar todos os estados;

Retomar melhor solução

FIM
```

Fonte: Produção do próprio autor.

Esse método obterá resultado otimizado para o problema, entretanto o custo computacional pode tornar-se inviável para sistemas com número elevado de barras. Logo, torna-se necessário a adoção de uma metodologia alternativa na qual um menor número de soluções visitadas seja demandado para que a solução possa ser obtida. Na próxima seção será apresentada uma nova estratégia.

3.3 Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos (AG) pertencem à família da computação evolutiva. Consistem em uma classe de programas cuja estrutura se baseia nos princípios da seleção natural, da teoria de Darwin. A apresentação das rotinas de AG realizou-se em 1975, por intermédio de Holland (KAGAN, N. et al, 2009).

Essas rotinas são, em outras palavras, métodos de busca e otimização de problemas. Algoritmos genéticos possuem uma vasta aplicação, incluindo a engenharia elétrica. A seguir, no Quadro 2, são apresentadas algumas vantagens da técnica AG em comparação a outras técnicas de busca de solução. A principal vantagem de AG em relação a outras técnicas de busca está vinculada com a robustez que esses algoritmos possuem (KAGAN, N. et al, 2009).

	ALGORITMOS GENÉTICOS	Outras técnicas	Exemplos de outras	
			técnicas	
Variáveis nas quais	Utilizam codificação dos parâmetros e	Empregam diretamente os	Métodos clássicos.	
operam:	operam em tais codificações.	parâmetros do problema.		
Conjuntos que trabalham:	Trabalham com populações de solução.	Trabalham com alternativa	Grasp, VNS, Busca	
		única de solução.	Tabu.	
Conhecimento sobre o	Precisam de informações da função	Função objetivo, derivadas	Método Simplex.	
problema:	objetivo.	e/ou informações auxiliares.		
Regras para busca de	A busca no espaço de soluções é	Busca baseada em métodos	Método do gradiente	
solução:	probabilística.	determinísticos.	reduzido.	

Quadro 2 - Vantagens Algoritmos Genéticos

Fonte: Produção do próprio autor.

De acordo com (KAGAN, N. et al, 2009), os componentes que definem o estado do problema formam um indivíduo de uma população que é representado por um cromossomo. Ainda de acordo com (KAGAN, N. et al, 2009) por meio de analogias aos processos biológicos de cruzamento, mutação e sobrevivência do melhor adaptado, novas populações são geradas.

Assim como no mecanismo biológico as novas populações são melhores que as anteriores e evoluem até que a solução "ótima" seja obtida. A seguir, temos a conceituação sucinta dos termos relevantes para a compreensão dos AG:

- População: conjunto de soluções candidatas para o problema em análise. Consiste em um agrupamento das representações que determinam uma resposta para o enunciado, isto é, uma estrutura contendo as codificações que representam o objetivo a ser avaliado.
- Cromossomo: codificação utilizada para representar uma possível solução do problema. Um exemplo de cromossomo pode ser representado conforme exibido na Figura 4:

Figura 4 –	Exemplo de	representação	de um	cromossomo	para AG
------------	------------	---------------	-------	------------	---------

Barra 5	Barra 4	Barra 3	Barra 2	Barra 1
1	0	0	1	0

Fonte: Produção do próprio autor.

Nesse exemplo, as posições com "1" representam a presença de unidade de Geração Distribuída em uma barra de um sistema hipotético. Os valores "0", por outro lado, sinalizam a ausência de tais elementos. Dessa forma, no modelo fictício de cinco barras, duas unidades de geração distribuída seriam alocadas na rede, nas posições "2" e "5".

- 3. Pais: consistem em cromossomos escolhidos para serem combinados (através do cruzamento) com a finalidade de gerar novos elementos para a população de soluções.
- 4. Função aptidão: expressão ou conjunto de expressões que visam quantificar o grau de adequação da solução para o problema. Tal bloco dos AG desempenha papel fundamental no processo de decisão de qual solução escolher. As soluções com melhor aptidão são aquelas que irão ser retornadas pelo programa ao final da execução da rotina.
- 5. Seleção: método através do qual os pais são selecionados. No presente trabalho o procedimento adotado consiste no método da roleta. Em tal metodologia cada indivíduo da população ocupa uma posição da roleta, sendo que a proporção da posição possui relação com a probabilidade de seleção que o indivíduo possui. Essas probabilidades estão vinculadas com seus resultados oriundos de sua avaliação pela função aptidão (função avaliação).
- 6. Cruzamento: procedimento através do qual acontece a formação de um novo indivíduo. Após a seleção dos pais, um novo indivíduo é formado através da combinação de parte do cromossomo do pai 1 e parte do cromossomo do pai 2. A Figura 5 representa uma situação de cruzamento.

Pai 1	1	0	0	1	1
Pai 2	0	1	1	0	0
Filho	1	0	0	0	0

Figura 5 – Exemplo de representação de um cruzamento

Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 6 ilustra a estrutura de funcionamento de um AG. Conforme pode ser observado na estrutura, o mesmo possui um trecho de inicialização, no qual a população inicial é aleatoriamente gerada. Em seguida, o produto obtido passa pelo processo de avaliação. Caso o critério de convergência tenha sido atingido o programa é finalizado. Se não for alcançado, a execução é prolongada através da evolução da população inicial, por meio de operações genéticas. Em acordo ao anteriormente mencionado as ações genéticas realizadas consistem na seleção, cruzamento e na mutação. Uma nova geração de população é gerada após realização dos procedimentos descritos. O processo repete-se até que o critério de parada seja atingido. Observa-se que para o presente trabalho o critério de parada adotado consistiu em um número máximo de iterações pré-estabelecido.



Figura 6 – Estrutura básica do funcionamento de um Algoritmo Genético

Fonte: Produção do próprio autor.

O funcionamento da rotina pode ser observado através do exemplo a seguir. Seja f(x,y) uma função da qual deseja-se encontrar o máximo global, representada pela Equação 23. Na Figura 7 está ilustrada graficamente a referida expressão.

$$f(x, y) = \operatorname{sen} x + \operatorname{sen} y \tag{23}$$

Figura 7 - Função exemplo para Algoritmo Genético



Fonte: Produção do próprio autor.

Conforme apontado pela Figura 7, f(x,y) possui no intervalo de análise máximos locais e o máximo global, apresentado em destaque na imagem. A aplicação do AG começa com a inicialização de um conjunto de indivíduos (população) candidatos a solucionarem o problema de maximizar a função. Temos a seguir, na Figura 8, os indivíduos da população inicial representados pelos pontos de cor preta.



Figura 8 – População inicial da função exemplo Algoritmo Genético

Fonte: Produção do próprio autor.

Após avaliação das soluções iniciais, por meio da função aptidão, inicia-se o processo de operações genéticas para evolução da população. A Figura 9 engloba as soluções atuais e suas respectivas evoluções, demarcadas em cor verde.





Fonte: Produção do próprio autor.

A próxima imagem, Figura 10, tem por objetivo ilustrar a geração posterior ao processo evolutivo da anterior. Percebe-se que o comportamento das soluções possui caminhada em direção ao ponto máximo global, sendo que a cor amarela representa o processo de evolução das soluções anteriormente assinaladas em verde. Com o avanço da execução do algoritmo os resultados caminham para o valor ótimo.



Figura 10 - Evolução próximas gerações em direção ao máximo global

Fonte: Produção do próprio autor.

Após o critério de parada ter sido atingido, a situação final após evoluções das soluções é exibida na Figura 11. A cor rosa representa a situação das soluções com o término da execução do algoritmo genético.

Figura 11 – Soluções finais do problema exemplo



Fonte: Produção do próprio autor.

Analisando o padrão comportamental apresentado nas figuras anteriores, referente aos indivíduos que fazem a composição da população, a característica evolutiva presente em Algoritmos Genéticos torna-se mais clara.

Percebe-se que devido ao fator de aptidão as soluções incialmente distantes do objetivo caminham em direção ao valor ótimo. Observa-se que para que isso ocorra, os parâmetros vinculados aos operadores genéticos, tais como taxa de cruzamento, taxa de mutação, tamanho de população e número máximo de gerações, devem ser ajustados apropriadamente para o problema (através de conhecimento particular sobre o enunciado ou de forma empírica).

Para o presente trabalho, no contexto de alocação de Geração Distribuída, a função de avaliação está vinculada ao objetivo e restrições definidos pelas Equações de 19 a 22. Observa-se que o cálculo do fluxo de potência na rede será empregado na função de avaliação (função objetivo, "F.0."), ilustrada na Figura 6. A função avaliação é definida como a seguir:

$$F.0.= Perdas + \xi RV \tag{24}$$

40

Na qual

- *RV* representa uma restrição violada;
- ξ representa uma constante (de valor elevado), escolhida arbitrariamente para aplicar uma penalização em soluções com características diferentes das estabelecidas pelas restrições.

As violações de restrições referem-se às restrições do problema, apresentadas na formulação da função objetivo. Além disso, quando a avaliação de alocação de Geração Distribuída estiver sendo realizada, a quantificação de GDs alocadas também será um parâmetro avaliado como restrição, isto é, caso seja desejado alocar uma unidade e o AG efetuar alocação de duas, por exemplo, tal situação será uma violação de restrição e, por isso, irá implicar em penalização da solução.

Dessa maneira, o código foi adaptado para as análises realizadas, considerando as violações de tensão, balanço de potência e número de geradores alocados como restrições para a função aptidão.

O funcionamento do algoritmo se baseia no valor do custo obtido para cada solução gerada (aleatoriamente, na etapa de inicialização e por processos evolutivos, posteriormente). A avaliação de cada solução é registrada e armazenada. Ao término do processo, a solução avaliada com menor valor é considerada a solução do problema.

4 TESTES E RESULTADOS

4.1 Apresentação da rede utilizada

Para aplicação dos conceitos, metodologias e técnicas discutidas ao longo do texto torna-se necessário a utilização de redes de distribuição. Nesse sentido, foi consultada a literatura técnica e a rede IEEE 13 barras foi selecionada.

4.1.1 Rede de distribuição de 13 barras

A Figura 11 consiste na representação da estrutura de treze barras, apresentada em (IEEE, 1992). Essa rede possui característica diversificada, pois nela estão inseridas cargas com distintas maneiras de ligação (monofásica, bifásica e trifásica- ligação delta ou estrela) e de diferentes modelos representativos (potência constante, impedância constante e corrente constante) além das linhas de transmissão com comportamento não simétrico (fases com impedâncias distintas).

Os dados completos referentes a esse sistema encontram-se no Anexo A.



Figura 12 – Rede 13 barras IEEE

Fonte: IEEE, (1992).

4.2 Sumário de testes

Após desenvolvimento de cada um dos códigos mencionados e apresentados em capítulos anteriores (fluxo de potência, Busca Exaustiva e Algoritmos Genéticos) essas rotinas foram aplicadas utilizando os dados da rede anteriormente mencionada como parâmetros de entrada.

A primeira etapa de testes realizados consiste na validação do código fluxo de potência. Essa rotina desempenha papel de grande importância no projeto, tendo em vista que os códigos de busca exaustiva e algoritmo genético utilizam o cálculo do fluxo de potência na rede como subsídio para determinação das perdas técnicas na rede. Utilizou-se uma rede com gabarito, isto é, estados de tensão e corrente nas barras do sistema conhecidos. Após elaboração do código comparou-se os resultados calculados com aqueles previamente conhecidos.

Após validação do algoritmo de fluxo de potência o algoritmo passou a ser utilizado para a rede em observação e registraram-se as perdas ao longo dos trechos, juntamente com os valores de potência absorvidos pelas cargas. Também se observou a situação das barras quanto ao atendimento da resolução da ANEEL referente aos patamares dos módulos de tensão.

O terceiro teste consistiu na alocação de uma unidade de Geração Distribuída na rede com a finalidade de redução das perdas obtidas no segundo teste. Para efetuar essa alocação utilizaram-se as abordagens de busca do melhor ponto por meio da Busca Exaustiva e através do Algoritmo Genético programados em MATLAB.

O teste seguinte, similar ao teste três, também consistiu na alocação Geração Distribuída. A diferenciação se dá no fato que nessa etapa mais de uma unidade de Geração Distribuída foi alocada. Na próxima seção serão apresentados os valores obtidos.

4.3 Resultados

O processo de constatação da validade do código de fluxo de potência elaborado realizou-se por intermédio do cálculo do erro percentual, exibido na Equação (25):

$$e_{\%} = \frac{(|V_{ieee}| - |V_{calc}|).100\%}{|V_{ieee}|}$$
(25)

Sendo que

- e_%: representa a relação percentual de diferença entre o valor real (referente ao gabarito disponibilizado pelo IEEE) e o valor obtido entre pelo código desenvolvido;
- *V_{ieee}*: consiste no valor de tensão especificado no gabarito IEEE;
- V_{calc} : tensão obtida pela execução do fluxo de potência elaborado.

Efetuando o cálculo do erro percentual para as barras do sistema, temos o resultado contido na Tabela 1. As tensões calculadas e os valores referentes ao gabarito IEEE podem ser obtidos no Anexo A.

Barra	<i>e</i> % (fase a)	<i>e</i> % (fase b)	<i>e</i> _% (fase c)
632	0	0	0
633	-0.0001	-0.0000	-0.0000
645		0.0034	0.0007
646		0.0053	0.0010
671	0.0142	0.0152	0.0310
680	0.0142	0.0152	0.0310
684	0.0137		0.0344
611			0.0378
652	0.0116		
692	0.0142	0.0152	0.0309
675	0.0169	0.0177	0.0343

Tabela 1 - Erro percentual código desenvolvido

Fonte: Produção do próprio autor.

Ressalta-se que a rede IEEE 13 barras passou por um processo de simplificação. Conforme exibido nos dados do Anexo A, no trecho entre as barras 632 e 671 existe uma carga uniformemente distribuída. Para facilitar o processo de análise toda a carga distribuída foi concentrada numa barra intermediária, 301, inserida no ponto médio do trecho entre 632 e 671.

A outra simplificação realizada consistiu eliminação do trecho contendo o regulador (entre 650 e 632). O valor regulado foi diretamente inserido na barra 632. Tais simplificações

implicaram em pequenos desvios dos valores do gabarito IEEE. Após análise constatou-se que o maior desvio possui valor menor que 1% e com isso contatou-se validade do código elaborado para obtenção do fluxo de potência. A rede simplificada pode ser visualizada na Figura 13.



Fonte: IEEE, (1992 modificado pelo autor).

Após execução do fluxo de potência para o sistema IEEE obtiveram-se as perdas técnicas ao longo da rede apresentadas no Quadro 3.

Rede	Nível de perdas [pu]		
13 barras	0.0512		

Quadro 3 - Estado base da rede quanto ao nível de perdas técnicas

Fonte: Produção do próprio autor.

Além disso, verificou-se a adequação das tensões com relação aos critérios estabelecidos pela ANEEL. O Gráfico 2 apresenta, para a rede de 13 barras, as informações referentes aos módulos de tensões para as fases A, B e C.



Gráfico 2 - Módulos de tensão para o caso inicial da rede de 13 barras (antes das alocações de GD)

Fonte: Produção do próprio autor.

Observa-se que apesar da fase C estar com comportamento inferior, quando comparada com as fases A e B, o conjunto de tensão está dentro da faixa considerada pela ANEEL, assim como as primeiras citadas.

Após obtenção do estado da rede o teste seguinte consistiu na busca de solução. O primeiro algoritmo empregado para alocação de elementos com a finalidade de redução de perdas tratou-se da busca exaustiva. O objetivo da aplicação consistiu na alocação de Geração Distribuída na rede em análise.

A primeira abordagem de alocação desenvolvida objetivava encontrar a melhor barra para alocação de uma unidade de Geração Distribuída. Temos os seguintes resultados, apresentados para a rede de 13 barras, exibidos na Tabela 2.

		Potência d	la Geração	Distribuída	1	
	0,1 pu	0,2 pu	0,3 pu	0,4 pu	0,5 pu	0,6 pu
Barra	Perda	Perda	Perda	Perda	Perda	Perda
	total [pu]	total [pu]	total [pu]	total [pu]	total [pu]	total [pu]
645	0.0512	0.0529	0.0563	0.0614	0.0681	0.0766
633	0.0507	0.0520	0.0550	0.0598	0.0663	0.0745
646	0.0580	0.0837	0.1283	0.1917	0.2740	0.3751
632	0.0512	0.0512	0.0512	0.0512	0.0512	0.0512
652	0.0414	0.0374	0.0393	0.0470	0.0606	0.0800
671	0.0366	0.0513	0.0951	0.1682	0.2704	0.4018
684	0.0415	0.0370	0.0376	0.0434	0.0543	0.0704
680	0.0432	0.0416	0.0463	0.0573	0.0746	0.0983
692	0.0366	0.0513	0.0951	0.1682	0.2704	0.4018
611	0.0410	0.0365	0.0375	0.0440	0.0562	0.0739
675	0.0396	0.0344	0.0357	0.0434	0.0576	0.0782
301	0.0512	0.0512	0.0512	0.0512	0.0512	0.0512

Tabela 2 - Perda total de potência ativa na rede após alocação de 1 unidade de GD

Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 2 expressa o resultado obtido para unidades de geração com diferentes potências (valores em pu). Para cada simulação registrou-se a perda global da rede quando uma unidade geradora foi alocada em alguma das barras. A Tabela 3 apresenta simplificadamente os resultados apresentados na Tabela 2, contendo apenas as melhores posições para alocação.

Observa-se que a Barra 301 corresponde a uma barra fictícia para representar o efeito da carga uniformemente distribuída entre as barras 671 e 632.

Potência de GD [pu]	Melhor barra para	Perda total
	alocação	[pu]
0,1	671, 692	0.0366
0,2	675	0.0344
0,3	675	0.0357
0,4	675, 684	0.0434
0,5	632, 301	0.0512
0,6	632,301	0.0512

Tabela 3 - Melhores barras para alocação de GD via Busca Exaustiva

Fonte: Produção do próprio autor.

Percebe-se, após observação das Tabelas 2 e 3, que o aumento do nível da potência da Geração Distribuída deve ser feito cautelosamente. Para a situação de "0,6 pu", por exemplo, a perda total possui mesmo valor que no caso básico, situação na qual não existe alocação de GD.

Utilizando o código de algoritmo genético elaborado obteve-se uma tabela com conformidade ao caso exibido nos dados das Tabelas 2 e 3. Tais resultados estão ilustrados na Tabela 4.

Potência da GD							
Seleção	0,1 pu	0,2 pu	0,3 pu	0,4 pu	0,5 pu		
Roleta							
Barra(s)	671, 692	675	675	675, 684	301, 632		
selecionada(s)							
Perda total	0.0366	0.0344	0.0357	0.0434	0.0512		

Tabela 4 - Resultados de Alocação GD pelo código de Algoritmo Genético

Fonte: Produção do próprio autor.

No Gráfico 3, tem-se a situação de tensão nas barras após a alocação de 1 unidade de GD na barra 675 (barra que implica menor perda). Observa-se que o comportamento não possuiu grandes variações em relação ao caso base, tendo em vista que o valor de potência injetado não foi elevado de forma a implicar em violação de restrições.



Gráfico 3 - Módulos de tensão para rede de 13 barras após alocação de 1 GD

Fonte: Produção do próprio autor.

A próxima etapa consistiu na determinação do estado da rede alocando-se mais que uma unidade de Geração Distribuída. Empregando a rotina de Busca Exaustiva, temos os resultados obtidos na Tabela 5.

Conclui-se que no caso de alocação de mais de uma GD, as melhores posições consistem nas barras 611 e 675.

Analogamente, utilizando a rotina de Algoritmo genético, temos os resultados exibidos na Tabela 6, na qual é apresentada a dupla de barras selecionadas após execuções consecutivas da rotina AG.

Percebe-se que houve incremento na perda global do sistema. Nota-se que aumentar a quantidade de geradores não reside na melhor estratégia para tal rede.

Barra 1	Barra 2	Perda [pu]	Barra 1	Barra 2	Perda [pu]
632	633	0,1445	646	680	0,1098
632	645	0,1432	646	692	0,1055
632	646	0,1438	646	611	0,1048
632	652	0,1056	646	675	0,1025
632	671	0,1054	646	301	0,1438
632	684	0,1051	652	671	0,0836
632	680	0,1097	652	684	0,0872
632	692	0,1054	652	680	0,0879
632	611	0,1046	652	692	0,0836
632	675	0,1024	652	611	0,0867
632	301	0,1437	652	675	0,0805
633	645	0,1440	652	301	0,1056
633	646	0,1446	671	684	0,0831
633	652	0,1064	671	680	0,0877
633	671	0,1062	671	692	0,0834
633	684	0,1059	671	611	0,0826
633	680	0,1105	671	675	0,0804
633	692	0,1062	671	301	0,1054
633	611	0,1055	684	680	0,0874
633	675	0,1032	684	692	0,0831
633	301	0,1445	684	611	0,0863
645	646	0,1499	684	675	0,0801
645	652	0,1051	684	301	0,1051
645	671	0,1049	680	692	0,0877
645	684	0,1046	680	611	0,0869
645	680	0,1092	680	675	0,0847
645	692	0,1049	680	301	0,1097
645	611	0,1041	692	611	0,0826
645	675	0,1019	692	675	0,0804
645	301	0,1432	692	301	0,1054
646	652	0,1057	611	675	0,0796
646	671	0,1055	611	301	0,1046

Tabela 5 - Alocação de 2 unidades de GDs via Busca Exaustiva Rede 13 barras

Potência da GD = 0,2 pu

Fonte: Produção do próprio autor.

646

684

0,1052

675

301

0,1024

Tabela 6 – Resultados	de alocação	de 2 unidades	de GD por AG
-----------------------	-------------	---------------	--------------

	Barras alocadas	Perda [pu]
611	675	0.0796

Fonte: Produção do próprio autor.

No Gráfico 4, tem-se a situação de tensão nas barras após a alocação de 2 unidades de GDs nas barras 611 e 675 (barras que implicam menor perda).



Gráfico 4 - Módulos de tensão para rede de 13 barras após alocação de 2 GDs

Fonte: Produção do próprio autor.

5 CONCLUSÕES

Em conformidade ao observado ao longo das simulações, o emprego da técnica de alocação de geração distribuída produz resultados significativos em termos de redução de perdas elétricas. Percebe-se que, quando o gerador alocado possui dimensionamento apropriado ao sistema no qual está inserido, observa-se além do benefício almejado de redução das perdas, a melhoria do perfil de tensão da rede pelo acréscimo de geração distribuída, principalmente nos casos de não conformidade com as normas ANEEL.

Com o desenvolvimento do projeto, constata-se a eficácia da metaheurística Algoritmo Genético no processo de alocação e dimensionamento de geração distribuída. Percebe-se que os resultados oriundos da busca são condizentes com aqueles obtidos por meio da alocação exaustiva.

O problema de alocação é de natureza combinatória, tendo em vista que o "cromossomo" representativo do estado no qual dois geradores estarão alocados pode assumir uma grande quantidade de opções, de acordo com as barras escolhidas. O número de possibilidades é dado pela Equação (26):

$$C = \frac{n!}{p! \left(n - p\right)!} \tag{26}$$

Na equação 26, "n" representa o número de barras disponíveis para alocação, enquanto "p" representa o tamanho do conjunto de combinações.

Para uma situação de sistema com 20 barras, por exemplo, a alocação de dois geradores possui 190 possibilidades de alocação. Percebe-se que com o aumento do número de barras e aumento da quantidade de geradores, o uso de busca exaustiva exige esforço computacional que tende a tornar-se demasiadamente grande. Por essa razão, justifica-se o uso de técnicas nas quais um menor número de soluções precisa ser visitado, tal como o Algoritmo Genético.

Conforme mencionado no texto, o AG exige menor esforço computacional que a Busca Exaustiva. A afirmação pode ser constatada por meio da contabilização do tempo médio de busca de solução de cada método, apresentada na Tabela 7. Para marcação do tempo os tempos de execução das rotinas foram mensurados por meio de função do MATLAB e o valor

médio dos valores foi registrado. Para as análises utilizou-se um computador com as seguintes configurações: Windows 10 64 bits, Processador Intel Core i3-4000M 2.40 GHz, Memória RAM 4.0 GB, 500GB de HD.

Técnica	Cenário simulado	Tempo médio
Busca Exaustiva	1 GD alocada	0.2780 [segundos]
AG		0.1080 [segundos]
Busca Exaustiva	2 GDs alocadas	2.1497 [segundos]
AG		0.5080 [segundos]

Tabela 7 - Tempo médio de execução dos Algoritmos

Fonte: Produção do próprio autor.

Com relação ao dimensionamento do nível de potência demandado pelo sistema, percebe-se que existe uma relação de compromisso no processo de alocação de geração distribuída. Aumentar a potência acima de um limiar, que está vinculado com a rede em observação, pode implicar tanto em aumento de violações de tensão quanto em ampliação das perdas técnicas nas linhas. Isso significa que é de interesse, sob a ótica da concessionária, estabelecer para suas redes tais limiares, podendo verificar a correlação tanto no nível global da rede quanto por trechos individuais.

5.1 Trabalhos futuros

O projeto desenvolvido possui pontos a serem refinados e explorados. Algumas sugestões de trabalhos posteriores incluem a análise da influência da GD por trechos do sistema. Observase que o trabalho trata das perdas técnicas da rede considerando o valor total, sem analisar a situação individual de cada linha do sistema. Tal análise identificará quais trechos são os maiores geradores de perda, bem como quais trechos produzem maiores desbalanceamentos nas fases da rede.

Adiciona-se como tarefa futura a avaliação do balanceamento de fases perante a inserção de GD. Para tal pode-se apoiar nas definições apresentadas no Módulo 8 do Prodist.

Além da tarefa de alocação dos algoritmos implementados, pode-se expandir a codificação de modo que o AG efetue dimensionamento de potência. Esse aspecto é de interesse para redes

com maior número de barras, nas quais o uso de Busca Exaustiva expande o tempo de simulação.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional: Prodist, Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica**. 2018. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/modulo-8 >. Aceso em 03/12/18.

EDP SÃO PAULO DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA S.A. **Demonstrações Contábeis Regulatórias**. Disponível em: <http://ri.edp.com.br/ptb/7992/EDP%20SP_DCR%202017_final.pdf>. Acesso em 11 de Novembro de 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2018**. Disponível em: http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018. Acesso em: 08 de Novembro de 2018.

FIGUEIREDO, G. A. D. **Caracterização das Perdas na Rede de Distribuição de Média Tensão**. 2012. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2012. Disponível em: https://repositorioaberto.up.pt/bitstream/10216/65740/1/000151451.pdf> Acesso em 11 de Novembro de 2018.

GRAINGER, J. J.; STEVERSON, W. D. JR. **Power System Analysis**. 1st ed. Singapore: McGraw-Hill, 1994.

INSTITUTO DE ENGENHEIROS ELETRICISTAS E ELETRÔNICOS. **IEEE 13 Node Test Feeder.** 1992. Disponível em: < https://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>. Acesso em: 29 de Novembro de 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. O que é Geração Distribuída. 2010. Disponível em: < http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp>. Acesso em: 29 de Novembro de 2018.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. ; ROBBA, E. J. Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2005.

KAGAN, N. et al. **Métodos de otimização aplicados a sistemas elétricos de potência.** 1. ed. São Paulo: Blucher, 2009.

KERSTING, W. H. **Distribution System Modeling and Analysis**. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2002.

K.U.Leuven - Energy Institute. Distributed Generation: Definition, Benefits and Issues. Bélgica, 2003.

MONTEMEZZO, J.F. Influência dos Parâmetros e Modelos de Linhas na Solução do Fluxo de Carga de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Programa de Pós Graduação de Sistemas Dinâmicos e Energéticos, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, 2016. INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. O que é Geração Distribuída. [2010 ?]. Disponível em: < http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp>. Acesso em: 29 de Novembro de 2018.

RUMÃO, P. O. O. Alocação e Dimensionamento de Geradores Distribuídos em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Visando a Redução de Perdas Ativas 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2017.

ANEXO A

1) Dados das redes

A seção tem por objetivo apresentar as informações referentes aos sistemas de distribuição utilizados ao longo do trabalho para análise da minimização de perdas.

1.1 Rede IEEE 13 barras

A) Cargas

Barra	Modelo	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-3
	de Carga	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
634	Y-PQ	160	110	120	90	120	90
645	Y-PQ	0	0	170	125	0	0
646	D-Z	0	0	230	132	0	0
652	Y-Z	128	86	0	0	0	0
671	D-PQ	385	220	385	220	385	220
675	Y-PQ	485	190	68	60	290	212
692	D-I	0	0	0	0	170	151
611	Y-I	0	0	0	0	170	80
	TOTAL	1158	606	973	627	1135	753

Tabela 8 - Caracterização das cargas concentradas da Rede 13 barras

Fonte: IEEE, (1992 modificado pelo autor).

Tabela 9 – Caracterizaçã	o das cargas	uniformemente	distribuída o	le Rede	13 barras
--------------------------	--------------	---------------	---------------	---------	-----------

Barra A	Barra B	Modelo	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-3
		de	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
		Carga						
632	671	Y-PQ	17	10	66	38	117	68

Fonte: IEEE, (1992 modificado pelo autor).

B) Bancos de capacitores

Barra	Ph-A	Ph-B	Ph-C
	kVAr	kVAr	kVAr
675	200	200	200
611			100
Total	200	200	300

Tabela 10 – Dados dos capacitores da Rede de 13 barras

Fonte: IEEE, (1992 modificado pelo autor).

C) Linhas de transmissão

Barra A	Barra B	Tamanho(ft.)	Configuração
632	645	500	603
632	633	500	602
633	634	0	XFM-1
645	646	300	603
650	632	2000	601
684	652	800	607
632	671	2000	601
671	684	300	604
671	680	1000	601
671	692	0	Switch
684	611	300	605
692	675	500	606

Tabela 11 - Caracterização dos trechos da Rede de 13 barras

Fonte: IEEE, (1992 modificado pelo autor).

8				
Configuração	Ligações fases	Fase	Neutro	Espaçamento
		ACSR	ACSR	ID
601	BACN	556,500	4/0 6/1	500
		26/7		
602	CABN	4/0 6/1	4/0 6/1	500
603	CBN	1/0	1/0	505
604	ACN	1/0	1/0	505
605	CN	1/0	1/0	510

Tabela 12 - Configurações das linhas aéreas

Fonte: IEEE, (1992 modificado pelo autor).

Tabela 13 –	Configuração	das linh	as subterrâneas
-------------	--------------	----------	-----------------

Configuração	Ligações	Cabo	Neutro	Space
	fases			ID
606	ABCN	250,000 AA,	None	515
		CN		
607	A N	1/0 AA, TS	1/0 Cu	520

Fonte: IEEE, (1992 modificado pelo autor).