UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FELIPE ZAMBORLINI DA SILVA

ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE GERAÇÃO DISTRIBUIDA EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO EMPREGANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

VITÓRIA

2018

FELIPE ZAMBORLINI DA SILVA

ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE GERAÇÃO DISTRIBUIDA EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO EMPREGANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para a obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos

VITÓRIA

2018

FELIPE ZAMBORLINI DA SILVA

ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE GERAÇÃO DISTRIBUIDA EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO EMPREGANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para a obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em 14 de dezembro de 2018.

COMISSÃO EXAMINADORA:

_____

Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

_____

Profa. Dra. Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora

_____

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

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus queridos pais, Rogério e Tânia, que sempre me incentivaram e sempre acreditaram em meu potencial sem medir esforços para que eu chegasse até aqui.

À minha irmã, por, pacientemente, revisar meu trabalho e pelo suporte em todas as horas.

Aos meus colegas de curso, por todos os momentos que compartilhamos ao longo dessa jornada.

Meus sinceros agradecimentos ao corpo docente do Departamento de Engenharia Elétrica da UFES, em especial ao meu orientador, professor Dr. Walbermark Marques dos Santos, ao professor Dr. Augusto César Rueda Medina e ao professor Dr. Ing. Edson de Paula Ferreira por todo o auxilio, a disponibilidade e o conhecimento compartilhado, tornando possível a consolidação deste trabalho.

À UFES, por me proporcionar uma educação de qualidade e fornecer diversas oportunidades para agregar conhecimento.

Por fim, gostaria de agradecer a todos que contribuíram de alguma forma ao longo de minha trajetória acadêmica.

RESUMO

O presente estudo propõe métodos de suporte ao planejamento da operação de sistemas de distribuição com a implantação de geração distribuída. Os métodos aplicados têm como base o algoritmo genético e solucionam problemas de alocação das unidades geradoras, visando a minimização das perdas da rede. Para tal, eles entregam como solução a localização e geração de cada unidade conectada, podendo haver restrição da geração total do sistema. Os métodos foram aplicados em uma rede radial de 34 barras, tendo sua aplicabilidade restringida a redes semelhantes. O *software* utilizado em todo o processo computacional foi o *Matlab*.

Palavras-chave: Geração Distribuída. Algoritmo Genético. Alocação Otimizada.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura da Rede de Subtransmissão e Distribuição Radial..... 22
Figura 2 – Estrutura de Subestação de Distribuição Atendendo a Quatro Alimentadores Radiais..... 23
Figura 3 – Estrutura de um Sistema de Geração Distribuída..... 26
Figura 4 – Sistema de Proteção em uma Rede Radial sem GD..... 30
Figura 5 – Sistema de Proteção em uma Rede Radial com GD..... 31
Figura 6 – Esquema de um Regulador de Tensão Bidirecional..... 32
Figura 7 – Esquema de um Alimentador Radial com Regulador de Tensão e GD..... 33
Figura 8 – Fluxo de Corrente em um Alimentador Radial com e sem GD..... 34
Figura 9 – Ilhamento Causado por uma Unidade de GD Solar..... 36
Figura 10 – Estrutura de um Sistema Fotovoltaico Isolado..... 37
Figura 11 – Estrutura de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede..... 37
Figura 12 – Irradiação Solar e Potência Gerada por Módulos Fotovoltaicos Relacionados à Hora do Dia..... 38
Figura 13 – Irradiação Horizontal Média Anual do Brasil..... 39
Figura 14 – Potencial Fotovoltaico do Brasil..... 39
Figura 15 – Esquema do Ciclo Evolutivo no Algoritmo Genético..... 42
Figura 16 – Estrutura de uma Máquina de Estado..... 43
Figura 17 – Algoritmo Geral de uma Busca Tabu..... 46
Figura 18 – Algoritmo Geral de uma Colônia de Formigas..... 47
Figura 19 – Geração Diária Média e Variável de uma Matriz Solar..... 50
Figura 20 – Configuração da Rede de Distribuição Primária..... 53
Figura 21 – Divisão de um Alimentador em Camadas de Posicionamento..... 57
Figura 22 – Fluxograma de Operação do Algoritmo Genético..... 63
Figura 23 – Exemplo de Solução Apresentada pelo Primeiro Método para 4 Pontos de Geração..... 66
Figura 24 – Exemplo de Solução Apresentada pelo Segundo Método para 3 Pontos de Geração..... 66

Figura 25 – Exemplo de Solução Apresentada pela Primeira Etapa do Terceiro Método..... 67
Figura 26 – Exemplo de Solução Apresentada pela Segunda Etapa do Terceiro Método..... 68

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Consumo Mundial de Energia por Fonte..... 15
Gráfico 2 – Investimento em Energia Renovável por Ano..... 16
Gráfico 3 – Relação Perdas Técnicas e Geração de uma Unidade de GD..... 34
Gráfico 4 – Demanda Ativa de Consumo do Alimentador por Barra..... 54
Gráfico 5 – Penalidade nas Perdas em Relação à Razão da Geração do Ponto de Conexão com a Demanda Ativa..... 64
Gráfico 6 – Nível de Tensão nas Barras do Alimentador sem Geração Distribuída..... 70
Gráfico 7 – Solução Método Exaustivo com 1 Ponto de Geração..... 71
Gráfico 8 – Perdas por Nº de Pontos de Geração do Método Exaustivo..... 71
Gráfico 9 – Nível de Tensão nas Barras para as Soluções do Método Exaustivo..... 72
Gráfico 10 – Solução Primeiro Método de Algoritmo Genético com 1 Ponto de Geração..... 73
Gráfico 11 – Solução Primeiro Método de Algoritmo Genético com 2 Ponto de Geração..... 74
Gráfico 12 – Solução Primeiro Método de Algoritmo Genético com 3 Ponto de Geração..... 74
Gráfico 13 – Solução Primeiro Método de Algoritmo Genético com 4 Ponto de Geração..... 75
Gráfico 14 – Solução Primeiro Método de Algoritmo Genético com 5 Ponto de Geração..... 75
Gráfico 15 – Perdas por Nº de Pontos de Geração do Primeiro Método de Algoritmo Genético..... 76
Gráfico 16 – Nível de Tensão nas Barras para as Soluções do Primeiro Método de Algoritmo Genético..... 77
Gráfico 17 – Solução Segundo Método de Algoritmo Genético com 1 Ponto de Geração..... 78
Gráfico 18 – Solução Segundo Método de Algoritmo Genético com 2 Pontos de Geração..... 79

Gráfico 19 – Solução Segundo Método de Algoritmo Genético com 3 Pontos de Geração..... 79
Gráfico 20 – Solução Segundo Método de Algoritmo Genético com 4 Pontos de Geração..... 80
Gráfico 21 – Solução Segundo Método de Algoritmo Genético com 5 Pontos de Geração..... 80
Gráfico 22 – Perdas por Nº de Pontos de Geração do Segundo Método de Algoritmo Genético..... 81
Gráfico 23 – Nível de Tensão nas Barras para as Soluções do Segundo Método de Algoritmo Genético..... 82
Gráfico 24 – Solução Terceiro Método de Algoritmo Genético com Liberdade de Pontos de Geração..... 83
Gráfico 25 – Solução Terceiro Método de Algoritmo Genético com Pontos de Geração Relevantes..... 84
Gráfico 26 – Perdas por Nº de Pontos de Geração do Terceiro Método de Algoritmo Genético..... 84
Gráfico 27 – Nível de Tensão nas Barras para as Soluções do Terceiro Método de Algoritmo Genético..... 85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Níveis de Tensão para Conexão de Centrais Geradoras..... 28
Tabela 2 – Dados da Rede de Distribuição..... 53
Tabela 3 – Dados do Processo de Otimização do Algoritmo Genético..... 63
Tabela 4 – Estado de Geração em um Ponto de Conexão no Alimentador..... 65
Tabela 5 – Perdas no Alimentador sem Geração Distribuída..... 69
Tabela 6 – Perdas no Alimentador Padrão e da Solução do Método Exaustivo..... 86
Tabela 7 – Perdas no Alimentador Padrão e da Solução Intermediária e Final do Método Misto..... 86
Tabela 8 – Perdas no Alimentador Padrão e das Soluções do Primeiro e Segundo Método de Algoritmo Genético..... 86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
GD	Geração Distribuída
IEC	International Electrotechnical Commission
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PC	Ponto de Conexão
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TP	Transformador de Potência
TC	Transformador de Corrente
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

LISTA DE SÍMBOLOS

V_b	Valor da tensão de base da rede de distribuição (V)
S_b	Valor de potência aparente de base da rede de distribuição (VA)
I_b	Valor da corrente de base da rede de distribuição (kA)
Z_b	Valor da impedância de base da rede de distribuição (Ω)
I	Corrente (A)
E	Tensão (V)
$Z_{m,n}$	Valor da impedância série do ramo de rede entre as barras m e n (Ω)
$R_{m,n}$	Valor da resistência série do ramo de rede entre as barras m e n (Ω)
$X_{m,n}$	Valor da reatância série do ramo de rede entre as barras m e n (Ω)
$z_{m,n}^{pu}$	Valor por unidade da impedância série do ramo de rede entre as barras m e n (pu)
S_m	Valor da demanda de potência aparente na barra m (VA)
P_m	Valor da demanda de potência ativa na barra m (W)
Q_m	Valor da demanda de potência reativa na barra m (var)
s_m^{pu}	Valor por unidade da demanda de potência aparente na barra m (pu)
$\mathrm{E}_{\mathrm{b_m}}^{(\mathrm{k\text{-}1})}$	Valor de tensão por unidade na barra m na iteração k-1 (pu)
$E_{b_m}^{(k)}$	Valor de tensão por unidade na barra m na iteração k (pu)
$\mathrm{E}_{\mathrm{b_n}}^{(\mathrm{k})}$	Valor de tensão por unidade na barra n na iteração k (pu)
$\mathrm{I}_{\mathrm{i_m}}^{(\mathrm{k})}$	Valor de corrente por unidade injetada na carga conectada à barra m na iteração k (pu)
$\mathrm{I}_{\mathrm{i_n}}^{(\mathrm{k})}$	Valor de corrente por unidade injetada na carga conectada à barra n na iteração k (pu)
$I_{f_{m,n}}^{(k)}$	Valor de corrente por unidade no ramo entre as barras m e n na iteração k (pu)
$I_{f_{n,l}}^{(k)}$	Valor de corrente por unidade no ramo entre as barras n e l na iteração k (pu)
$I_{F_{m,n}}$	Valor de corrente no ramo entre as barras m e n (kA)

$P_{e_{m,n}}$	Valor de perdas de potência ativa no ramo entre as barras m e n (W)
P_T	Valor de perdas de potência ativa totais no sistema (W)
R	Valor de resistência em um cabo (Ω)
I	Valor de corrente em um cabo (A)
Pe	Valor de perdas de potência ativa em um cabo (W)
L	Conjunto de barras a jusante de uma barra n
ng	Número de geradores distribuídos no sistema
B	Número total de barras no sistema
e	Estado de geração de uma barra do sistema
j	Número imaginário ($\sqrt{-1}$)
A	Matriz de w linhas e y colunas
M	Matriz invertível de w linhas e y colunas
N	Matriz de w linhas e y colunas
b	Vetor de w linhas e uma coluna
x	Vetor de y linhas e uma coluna
$x^{(k)}$	Vetor de y linhas e uma coluna na iteração k
$x^{(k+1)}$	Vetor de y linhas e uma coluna na iteração k-1
m	Número da barra do sistema a montante de uma barra n
n	Números das barras do sistema a jusante de uma barra m
l	Números das barras do sistema a jusante de uma barra n

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO..... 15
1.1 JUSTIFICATIVA E OBJETIVO..... 18
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO..... 20

2 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO..... 21
2.1 REDE DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL..... 24

3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA..... 26
3.1 IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO. 28
3.2 TECNOLOGIA SOLAR FOTOVOLTAICA..... 36

4 MÉTODO DE ALOCAÇÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA..... 40
4.1 ALGORITMOS EVOLUTIVOS..... 40
4.1.1 Algoritmo Genético..... 41
4.1.2 Programação Evolutiva..... 43
4.1.3 Estratégias Evolutivas..... 44
4.2 BUSCA TABU..... 45
4.3 COLÔNIA DE FORMIGAS..... 46
4.4 BUSCA EXAUSTIVA..... 48

5 METODOLOGIA..... 49
5.1 RESTRIÇÕES..... 49
5.2 SOLUÇÃO DO PROBLEMA 52
5.2.1 Rede de Distribuição..... 52
5.2.2 Fluxo de Potência..... 55
5.2.3 Perdas de Potência Ativa..... 59
5.2.4 Algoritmos de Alocação Otimizada..... 60
5.2.4.1 Método Exaustivo..... 60
5.2.4.2 Métodos com Algoritmo Genético..... 62
5.2.4.2.1 Método com Restrição na Quantidade de Pontos de Geração..... 64
5.2.4.2.2 Método com Restrição na Quantidade de Pontos de Geração e Geração Total..... 66

5.2.4.2.3 Método Misto..... 67

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... 69
6.1 ALIMENTADOR SEM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA..... 69
6.2 MÉTODO EXAUSTIVO..... 70
6.3 MÉTODO DE ALGORITMO GENÉTICO COM RESTRIÇÃO DE PONTO DE GERAÇÃO..... 72
6.4 MÉTODO DE ALGORTIMO GENÉTICO COM RESTRIÇÃO DE PONTO E QUANTIDADE DE GERAÇÃO..... 78
6.5 MÉTODO DE ALGORTIMO GENÉTICO MISTO..... 82
6.6 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS..... 85

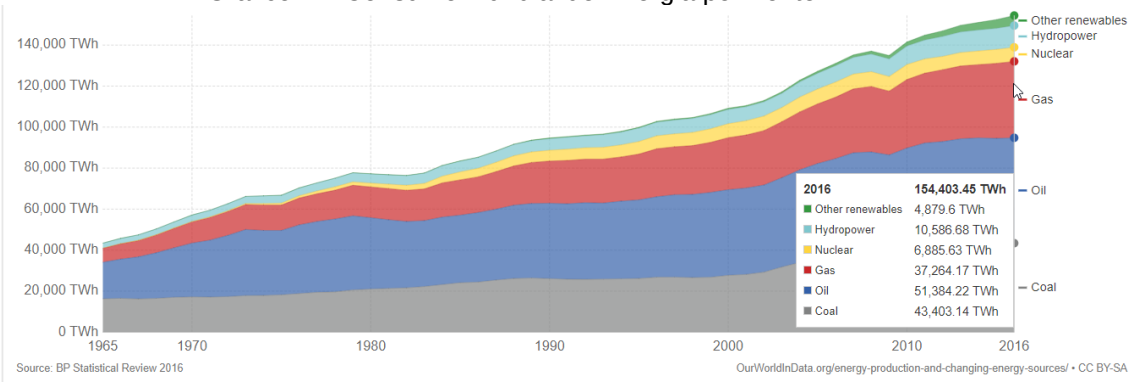
7 CONCLUSÃO..... 88

REFERÊNCIAS..... 90

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a ameaça das mudanças climáticas, tais como o aumento dos desastres ambientais e das temperaturas médias globais; bem como os impactos negativos que a matriz de energia global possui sobre o meio ambiente (Gráfico 1), cuja constituição é formada, majoritariamente, por fontes não renováveis de energia (carvão, petróleo e gás natural), se tornaram uma força motriz de mudança nos ideais da sociedade internacional no que diz respeito à utilização dos seus recursos naturais. (RITCHIE; ROSER, 2018, tradução nossa)

Gráfico 1 – Consumo Mundial de Energia por Fonte



FONTE: BP Statistical Review, *apud* RITCHIE; ROSER, 2018.

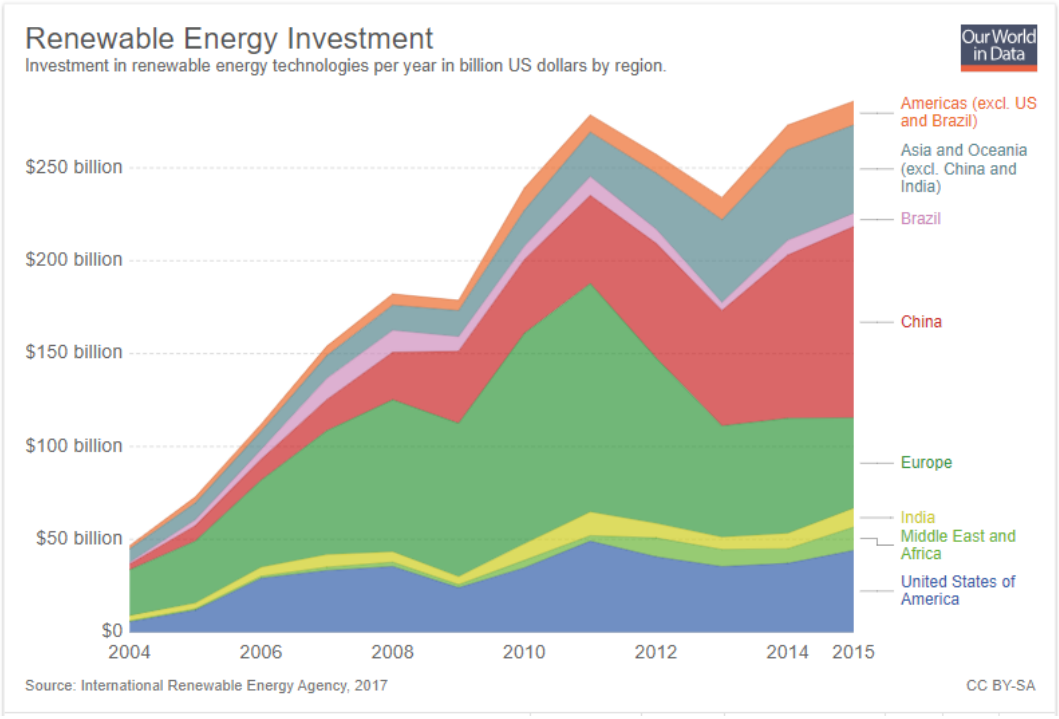
Assim, governos, empresas e sociedades em todo o mundo começaram a se mobilizar com o objetivo de encontrar alternativas para a utilização de seus recursos energéticos de maneira eficiente, econômica e sustentável.

Neste contexto, diferentes fontes renováveis de energia elétrica, tais como solar fotovoltaica, eólica e biomassa, passaram a ter destaque numa escala global. Ademais, outras fontes renováveis de energia, como hídrica, geotérmica e maremotriz, também ganharam destaque, porém, numa escala menor, em razão de sua maior restrição de localidade. (RITCHIE; ROSER, 2018, tradução nossa)

Dessa forma, como pode ser verificado no Gráfico 2, governos começaram a incentivar o uso de fontes de energia renováveis através do aumento de investimentos em estudos na área e desenvolvimento de novas tecnologias, que chegam hoje a mais de $ 250 bilhões anuais; além da diminuição da carga tributária

exercida sobre esses ativos e da criação do mercado de créditos de carbono, o qual passou a dar um valor econômico à redução de emissão de gases do efeito estufa. (RITCHIE; ROSER, 2018, tradução nossa)

Gráfico 2 – Investimentos em Energia Renovável por Ano



FONTE: BP Statistical Review, *apud* RITCHIE; ROSER, 2018.

Além disso, muitas empresas implementaram o uso de energia limpa como forma de economia e "*marketing";* e o meio acadêmico passou a desenvolver pesquisas e projetos sobre o tema, produzindo novas tecnologias de geração, sistemas de controle e métodos de implementação mais eficazes e baratos.

Dessa necessidade por uma ampla implantação de energia renovável é que o conceito da Geração Distribuída se alinha com o de fontes renováveis de energia. De acordo com Almeida, (2016, p. 1) a Geração Distribuída consiste na produção de energia realizada nas proximidades dos consumidores independentemente da tecnologia, potência e fonte de geração utilizada (renovável ou não), ou seja, é um método de geração de energia não centralizada que ocorre no nível de distribuição do Sistema Elétrico de Potência (SEP), ignorando, portanto, as perdas ligadas à transmissão e à transformação nas subestações.

Consoante Ackermann et al (*apud* SKORUPA; MARTINS; PAZ, 2018, p. 1):

> Geração Distribuída é uma fonte de energia ligada diretamente à rede de distribuição ou ao local de medição do cliente. A distinção entre as redes de distribuição e transmissão baseia-se na definição legal, que é normalmente parte da regulação do mercado de eletricidade em cada país.

Dada à possibilidade de tamanho reduzido de sistemas renováveis para a geração de energia, como fotovoltaica e eólica, por exemplo, a Geração Distribuída é definida como o principal método alternativo para o planejamento da implementação de fontes de energia renováveis no sistema elétrico de potência.

No Brasil, de acordo com a Resolução Normativa ANEEL nº 687/2015, é permitido conectar a rede de distribuição através de unidades consumidoras, centrais geradoras de qualquer fonte renovável de energia elétrica com potência instalada até 75 kW, denominada microgeração distribuída; ou com potência instalada superior a 75 kW e inferior ou igual a 5 MW, denominada minigeração distribuída. (ANEEL, 2015a)

Conforme o art. 6º, §1º da referida Resolução, caso a geração da unidade de GD seja maior que a energia consumida no período,

> §1º Para fins de compensação, a energia ativa injetada no sistema de distribuição pela unidade consumidora será cedida a título de empréstimo gratuito para a distribuidora, passando a unidade consumidora a ter um crédito em quantidade de energia ativa a ser consumida por um prazo de 60 (sessenta) meses. (Redação dada pela RN ANEEL 687/2015)

Entretanto, utilizar a técnica de GD no sistema de distribuição de energia elétrica, em sua maioria radial e com fluxo unidirecional de potência, resultará em impactos na dinâmica do SEP, como a presença de fluxo de potência bidirecional, variação nas perdas de potência ativa, aumento do nível de tensão, alteração da seletividade de equipamentos de proteção e operação dos reguladores de tensão. (SKORUPA; MARTINS; PAZ, 2018, p. 1)

Desta forma, é extremamente necessário realizar um estudo referente à alocação e ao dimensionamento de geradores distribuídos no sistema de energia de potência,

visando usufruir dos impactos técnicos desejados e contornar os indesejados, a fim de otimizar a operação de todo o sistema.

1.1 JUSTIFICATIVA E OBJETIVO

Referido estudo é dotado de relevância, pois os estímulos à geração distribuída podem gerar inúmeros benefícios ao sistema de distribuição de energia, com o escopo de compensar algumas das desvantagens presentes em um sistema de geração totalmente centralizado, tais como: “[...] o adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, o baixo impacto ambiental, a redução no carregamento das redes, a minimização das perdas e a diversificação da matriz energética”. (ANEEL, 2015a)

A Geração Distribuída é considerada um sistema mais confiável em decorrência das diversas fontes de geração de energia que o compõe, sendo possível contornar, com mais facilidade, as falhas de pequeno porte no sistema de distribuição. A implementação desse sistema é capaz de fornecer uma rápida resposta ao aumento da demanda da região, devido à instalação de novos geradores em um curto espaço de tempo. (ALMEIDA, 2016, p. 16)

Ademais, o mesmo reduz as perdas que ocorrem na transmissão de energia e nos transformadores das subestações, dado que parte da demanda passa a ser gerada na própria zona de consumo; bem como contribui com a redução de investimentos com linhas de transmissão para atender à sempre crescente demanda de energia elétrica.

Destaca-se, ainda, que a proximidade das fontes geradoras ao consumidor também garante um melhor perfil de tensão, diminuindo a necessidade de investimento em reguladores de tensão.

Nota-se que as perdas em um SEP com GD estão relacionadas ao tamanho e nível de penetração da unidade de GD, à distribuição e à intensidade do fluxo de carga

nas linhas. Com a implementação de um sistema de geração distribuída em um sistema de energia toda a dinâmica do fluxo de potência é alterado e, consequentemente, o mesmo ocorre para a dinâmica das perdas. (SKORUPA; MARTINS; PAZ, 2018, p. 2)

Quando alocada em um ponto ótimo, a unidade de GD aliviará o carregamento das linhas, desta maneira, é importante afirmar que o local considerado ótimo para a unidade de GD variará de acordo com a função objetivo a qual se deseja otimizar. (SKORUPA; MARTINS; PAZ, 2018, p. 2)

Todavia, para garantir uma energia elétrica de qualidade deve-se saber os pontos ótimos para a alocação das unidades de geração de energia elétrica em um sistema de Geração Distribuída, pois, caso sejam mal alocados, o fluxo de potência pode causar impactos negativos nos ativos da rede, como, por exemplo, aumento das perdas de potência; aumento de correntes de curto-circuito e no carregamento dos cabos condutores, podendo permitir até que os mesmo superem sua capacidade térmica; e perda da seletividade do sistema de proteção. (ALMEIDA, 2016, p. 3)

Saber alocar de maneira correta essas unidades de geração é de crucial importância para que um sistema de Geração Distribuída seja confiável e seguro. Assim, faz-se necessário uma visão detalhada de todos os aspectos envolvidos, bem como lançar mão de ferramentas computacionais para auxiliar nas simulações de forma a otimizar a alocação das unidades de Geração Distribuída, com o escopo de usufruir dos seus benefícios enquanto se evita os malefícios que este tipo de sistema pode causar, garantindo, portanto, uma melhor qualidade da energia elétrica e segurança do sistema.

Para resolver as problemáticas inerentes à alocação ótima de unidades de GD, pesquisadores empregaram diferentes técnicas convencionais de otimização como o fluxo de potência de Newton-Raphson, as abordagens analíticas, a inteligência artificial e os algoritmos evolutivos. (RUEDA-MEDINA et al., 2013, p. 1, tradução nossa)

Desta forma, o objetivo do referido estudo é desenvolver um algoritmo, que fará uso de métodos de otimização heurísticos, como o algoritmo genético, para realizar a alocação de geradores distribuídos em um sistema de distribuição de energia elétrica, tendo como função objetivo a otimização de um dos diversos parâmetros de rede que são impactados pelos sistemas de GD. No caso deste estudo, o parâmetro otimizado pela função objetivo será as perdas de potência ativa do alimentador analisado.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Os capítulos do trabalho estão organizados no seguinte formato:

Nos capítulos 2, 3 e 4 serão tratados o embasamento teórico dos principais tópicos do trabalho, como conceitos da geração distribuída e suas diferentes tecnologias de geração, os principais impactos na implementação destes modelos de sistemas, as normas vigentes no Brasil e a descrição da técnica de otimização utilizada.

No capítulo 5 será demonstrada a metodologia de desenvolvimento utilizada para alcançar o objetivo do trabalho. Será, também, apresentado o alimentador utilizado, a técnica de análise de fluxo de potência e o cálculo das perdas, bem como os algoritmos de otimização empregados.

O capítulo 6 terá a apresentação dos resultados obtidos pelas simulações e comentários sobre os mesmos. Referido capítulo consistirá de gráficos de alocação de geração distribuída, potência injetada por barra, os impactos nas perdas de cada uma das alocações simuladas e a comparação entre as quatro técnicas de otimização utilizadas.

Por fim, no capítulo 7, serão apresentadas as conclusões gerais do trabalho e possíveis desenvolvimentos futuros para o mesmo.

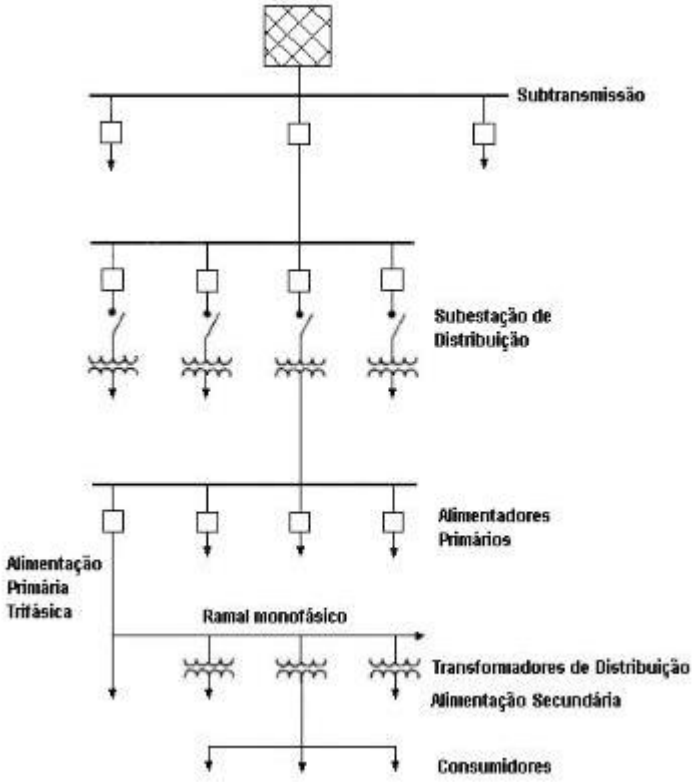
2 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Inicialmente, é importante destacar que o sistema de distribuição é, frequentemente, energizado por uma ou mais linhas de subtransmissão fazendo uso de transformadores redutores em subestações. Estes, de acordo com os padrões do IEC, são transformadores de 33/11 kV e “[...] alimentam diversos alimentadores primários que são, usualmente, alimentadores de distribuição radiais, caracterizados por seu fluxo unidirecional de potência da subestação ao consumidor”. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 16, tradução nossa)

No Brasil, a rede de subtransmissão é definida como linhas e subestações que fazem a conexão dos geradores e barras de rede básica às subestações de distribuição com níveis de tensão que são maiores ou iguais a 69 kV e inferiores a 230 kV. Já a rede de distribuição consiste no conjunto de linhas e equipamentos com tensão em níveis inferiores a 69 kV que transportam a energia para boa parte dos consumidores. Ambas as redes são conectadas por subestações de distribuição que contém, tipicamente, transformadores de força redutores com o enrolamento primário no nível de tensão das redes de subtransmissão e o secundário com os níveis das redes de distribuição. (ANEEL, 2016c, p. 6)

É importante salientar que alguns níveis comuns de tensão para redes de subtransmissão são 69 kV, 88 kV e 138 kV, enquanto que para o primário das redes de distribuição são usuais os níveis 34,5 kV, 13,8 kV, 11,9 kV e 11,4kV. (USP, 20--, p. 4)

Figura 1 – Estrutura da Rede de Subtransmissão e Distribuição Radial

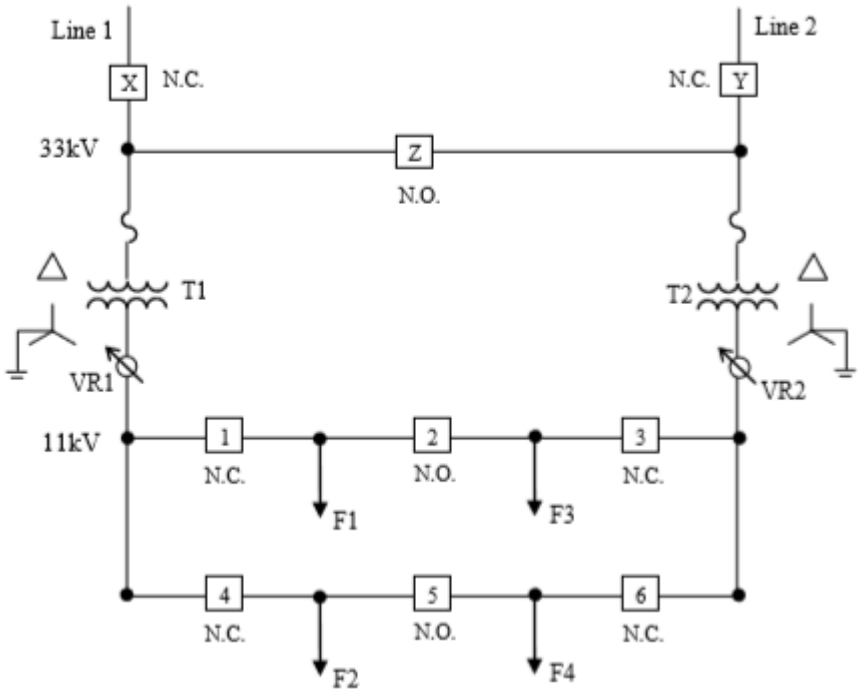


FONTE: LEÃO, 2009, p. 3.

A Figura 1 representa a estrutura de uma Rede de Subtransmissão e Distribuição Radial. Na presente estrutura, como discutido, pode-se observar que a rede de subtransmissão se conecta, através de transformadores redutores nas subestações de distribuição, ao alimentador primário da rede de distribuição que, por sua vez, se conecta ao alimentador secundário da mesma rede através de transformadores de distribuição. Estes estão comumente alocados ao longo da rede de distribuição nos postes de distribuição, em estruturas denominadas subestações aéreas. O fluxo de potência nessa estrutura é, tipicamente, unidirecional, fluindo das subestações para os consumidores.

As redes radiais podem possuir conexões em anel, ou seja, diferentes alimentadores conectados a um mesmo alimentador em comum, criando uma espécie de *loop*, o qual permite que a energia tenha mais de um percurso possível para atender a uma carga específica, a fim de permitir um restabelecimento rápido da energia, caso algum destes alimentadores venham a falhar. Contudo, somente um destes estará de fato conectado ao alimentador em comum.

Figura 2 – Estrutura de Subestação de Distribuição Atendendo a Quatro Alimentadores Radiais



FONTE: AL-SABOUNCHI, 2011, p. 15.

Observa-se, na Figura 2, a existência de dois alimentadores que atendem duas subestações de distribuição, as quais, por sua vez, atendem quatro alimentadores da rede de distribuição primária. As chaves ou os disjuntores ‘X’, ‘Y’, ‘1’, ‘3’, ‘4’ e ‘6’ estão normalmente fechados, enquanto ‘Z’, ‘2’ e ‘5’ estão normalmente abertas. Logo, o sistema apresentado é do tipo radial com um fluxo unidirecional de potência, onde o alimentador ‘1’ atende o transformador ‘T1’ que, por seu turno, atende os alimentadores ‘F1’ e ‘F2’, enquanto que o alimentador ‘2’ atende o transformador ‘T2’ que, por conseguinte, serve os alimentadores ‘F3’ e ‘F4’. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 15, tradução nossa)

No entanto, o sistema apresentado possui alimentadores reservas conectados em anel para, caso algum dos alimentadores utilizados venha a ter alguma falta, as chaves normalmente fechadas possam ser abertas, visando isolar a falta em questão; e as normalmente abertas podem ser fechadas para restaurar a alimentação das cargas afetadas. Por exemplo, na hipótese de o transformador ‘T1’ sair de operação, as chaves ‘1’ e ‘4’ serão abertas e as ‘2’ e ‘5’ fechadas, passando os alimentadores ‘F1’ e ‘F2’ a serem atendido, também, pelo transformador ‘T2’. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 17, tradução nossa)

2.1 REDE DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL

Um alimentador de distribuição radial possui, normalmente, sua estrutura formada por um alimentador primário principal trifásico e alimentadores laterais que se ramificam do mesmo, podendo estes serem tri, bi ou monofásicos. Este alimentador pode ser aéreo ou subterrâneo e possui diversos equipamentos em sua estrutura, tais como regulador de tensão, capacitores, relés de proteção, chaves faca-seccionadoras e chave fusível. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 17, tradução nossa)

Dentre as principais características de uma rede de distribuição radial, merecem destaque as seguintes:

- A tensão na rede primária varia entre 1 kV e 69 kV, baseado nas definições de Média Tensão da ANEEL; (2016d, p. 42)
- As tensões na rede secundária são menores que 1 kV, baseado nas definições de Baixa Tensão da ANEEL, sendo comumente utilizadas as tensões de linhas de 380 V e 220 V; (LEÃO, 2009, p. 3)
- O comprimento do alimentador principal normalmente está entre o intervalo 1,5-30 km;
- Os transformadores de distribuição possuem capacidade que podem variar de pequenos valores como 15 KVA até mais de 5 MVA;
- Possuem dispositivos de controle em seu percurso, como os reguladores de tensão e o banco de capacitores, para corrigir o fator de potência de consumidores com alto consumo de reativos e manter a tensão de fim de linha em valores aceitáveis;
- Dispositivos de proteção, como disjuntores, religadores, chaves facas e fusíveis, estão presentes em diversos pontos do alimentador a fim de garantir os padrões de segurança, a confiabilidade e a proteção dos equipamentos na operação do sistema;
- Suas fases podem estar dispostas tanto na configuração Y quanto em Δ;
- A rede pode ser uni ou multiaterrada, sendo possível haver impedância de aterramento; ou, então, pode estar isolada;
- O fluxo de potência em um alimentador radial flui em direção aos consumidores de maneira decrescente, de modo que, as cargas que

representam estes consumidores podem estar uniformes ou discretamente dispostas, sendo esta última disposição a mais comum. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 17-18, tradução nossa)

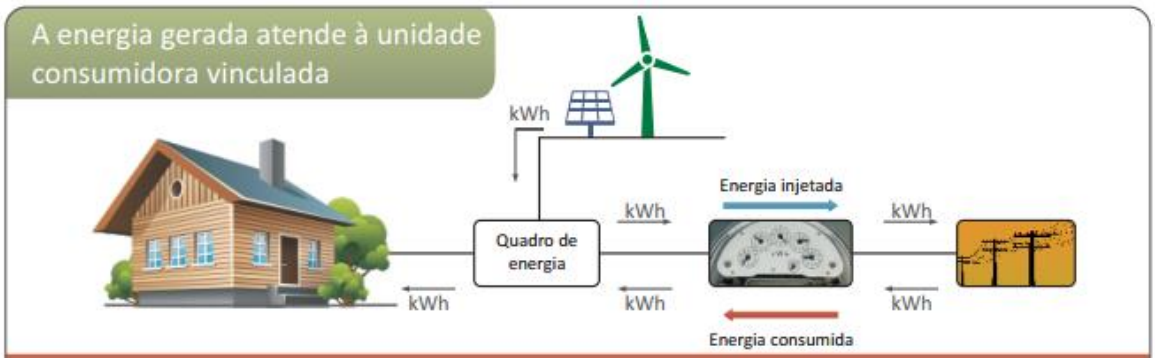
3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A definição de geração distribuída difere do conceito de fluxo unidirecional de potência, no qual os sistemas de distribuição são normalmente projetados. Estes sistemas geradores possuem capacidade não superior à 20 MW e são conectados na rede de distribuição. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 18, tradução nossa)

Nas últimas duas décadas, houve um grande crescimento no interesse dessa modalidade de geração devido a diversos fatores, como, por exemplo, o desenvolvimento de novas tecnologias de GD; a crescente demanda por um fornecimento de energia confiável atrelado ao atraso de investimentos em melhorias na rede de distribuição; e a busca por fonte limpas de energia, devido à progressiva preocupação com o aquecimento global. Destaca-se que, dado o limite de capacidade de geração das unidades de GD, é apropriado que as mesmas sejam conectadas em alimentadores com tensões menores ou iguais a 33 kV. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 18-19, tradução nossa)

No Brasil, Geração Distribuída são unidades geradoras de energia elétrica cujas instalações são realizadas de maneira direta ao sistema elétrico de distribuição ou fazendo uso de instalações prévias de consumidores. As mesmas independem da potência, podem operar tanto em paralelo quanto de forma isolada e podem ser ou não despachada pela ONS. (ANEEL, 2016b, p. 38)

Figura 3 – Estrutura de um Sistema de Geração Distribuída



FONTE: ANEEL, 2016a, p. 16.

A potência fornecida pelas unidades geradoras do sistema de geração distribuída atenderá o consumidor ao qual está vinculada e o seu excedente será injetado na

rede e contabilizado na medição do consumidor. No Brasil, a energia injetada gera créditos ao consumidor, não revertível em dinheiro e nem comercializável, que podem ser utilizados como compensação para as faturas dos meses seguintes, com validade de 60 meses. (Art. 6º, §1º, RN ANEEL nº 687/2015)

Embora qualquer tecnologia de geração de energia elétrica possa ser utilizada em um sistema de GD, o destaque atual é para as tecnologias cuja matriz energética seja considerada renovável, tendo em vista a relevância das mesmas na esfera do desenvolvimento sustentável. Dentre as tecnologias existentes atualmente, algumas das mais comuns fontes renováveis utilizadas na geração distribuída são (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 19, tradução nossa):

- Fotovoltaica;
- Turbinas Eólicas;
- Células de Combustível;
- Turbinas a Gás;
- Pequenas Centrais Hidrelétricas;

Ademais, a ANEEL classifica a geração distribuída em duas definições:

> I - microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;
> II - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5MW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras; (art. 2º, RN ANEEL nº 482/2012)

Na Tabela 1 estão explicitados os níveis de tensão definidos pela ANEEL para conexões de Centrais Geradoras no SEP. Entretanto, para Centrais Geradoras classificadas como Micro ou Minigeração Distribuída, tanto o nível de tensão, quanto a quantidade de fases de conexão da central geradora à rede são definidos pela distribuidora, dada as características técnicas da rede e em conformidade com a regulamentação vigente.

Tabela 1 – Níveis de Tensão para Conexão de Centrais Geradoras

Potência Instalada	Nível de Tensão de Conexão
< 10 kW	Baixa Tensão
10 a 75 kW	Baixa Tensão
76 a 150 kW	Baixa Tensão / Média Tensão
151 a 500 kW	Baixa Tensão / Média Tensão
501 kW a 10 MW	Média Tensão / Alta Tensão
11 a 30 MW	Média Tensão / Alta Tensão
> 30 MW	Alta Tensão

FONTE: ANEEL, 2016d, p. 37.

Conforme já mencionado, a implementação de Geração Distribuição na rede pode trazer muitos benefícios ao sistema caso os geradores sejam otimamente alocados, tais como

> [...] a redução das perdas das linhas, o melhoramento no perfil de tensão, a diminuição na demanda máxima do sistema, o adiamento de investimentos para aumento de capacidade da rede, a melhor confiabilidade do sistema e a redução de emissões carbônicas. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 19, tradução nossa)

Apesar de todos os benefícios elencados, a GD pode gerar alguns impactos na Rede de Distribuição. Portanto, faz-se necessário analisá-los no tópico subsequente.

3.1 IMPACTO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

Os impactos técnicos decorrentes da implantação de sistemas de GD em um sistema de distribuição são as principais dificuldades durante o planejamento desse tipo de sistema. Dentre eles, os mais notáveis são: “[...] a inversão do fluxo de potência, a elevação da tensão, a sobrecorrente, o ilhamento não-intencional e [...] [a variação] das perdas de potência ativa [...]”. (ALMEIDA, 2016, p. 13)

Os impactos técnicos na qualidade da energia, proteção e segurança do sistema são fatores extremamente importantes. Os distúrbios na tensão, o controle do fator de

potência e as distorções harmônicas totais são os principais fatores que impactam a qualidade da energia. Já os fatores que mais impactam a proteção e a segurança do sistema são o ilhamento, os distúrbios nos relés de proteção unidirecionais e o aumento nas correntes de falta. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 20, tradução nossa)

Desta forma, faz-se necessário detalhar os principais impactos que um sistema de GD causa em uma rede de distribuição.

a) Fluxo Reverso de Potência

O sistema brasileiro foi, originalmente, planejado no conceito de grandes unidades geradoras distantes dos centros de cargas e centralizadas, possuindo um grande número de linhas de transmissão e distribuição para realizar a conexão entre essas unidades e as cargas consumidoras. (ALMEIDA, 2016, p. 14)

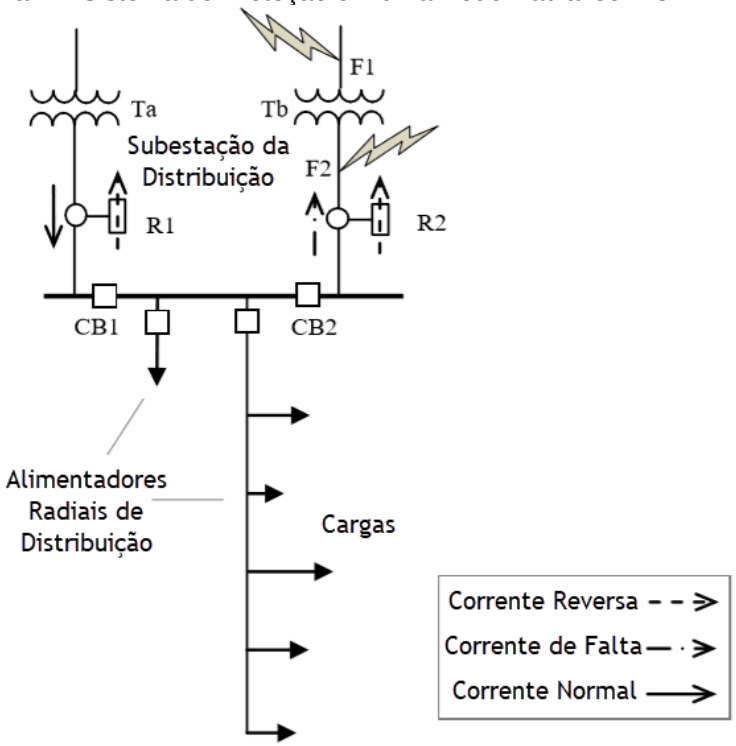
A unidade de GD conectada à rede de distribuição irá injetar uma quantidade de potência, de modo que, caso essa quantidade seja maior que a demanda no ponto de conexão, essa potência irá fluir do ponto de conexão na rede radial de distribuição em direção à subestação. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 20, tradução nossa)

A existência de um fluxo reverso é a principal causa dos demais impactos causados por um sistema com GD. Portanto, é considerado o parâmetro fundamental na análise de um sistema de geração distribuída.

b) Impacto na Proteção Unidirecional

O fluxo reverso de energia, dependendo de sua magnitude, pode deturpar a operação de relés de proteção causando, assim, a atuação da proteção mesmo sem a presença de faltas. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 21, tradução nossa)

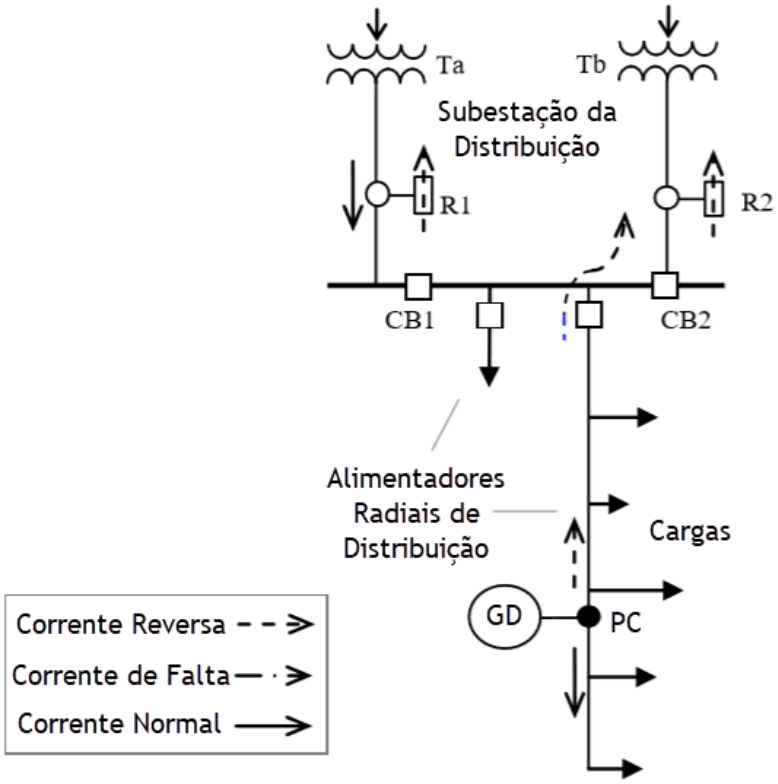
Figura 4 – Sistema de Proteção em uma Rede Radial sem GD



FONTE: AL-SABOUNCHI, 2011, p. 21.

Na Figura 4 temos o sistema de proteção de um alimentador radial sem geração distribuída. Na saída das subestações ‘Ta’ e ‘Tb’ existem, respectivamente, dois relés unidirecionais (‘R1’ e ‘R2’) que atuam sobre os disjuntores ‘CB1’ e ‘CB2’, respectivamente. Por exemplo, na ocorrência de falta em ‘F1’ ou ‘F2’, uma corrente de falta passará por ‘R2’ no sentido reverso que detectará este fluxo reverso de corrente e atuará abrindo o disjuntor ‘CB2’, isolando a falta. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 21, tradução nossa)

Figura 5 – Sistema de Proteção em uma Rede Radial com GD



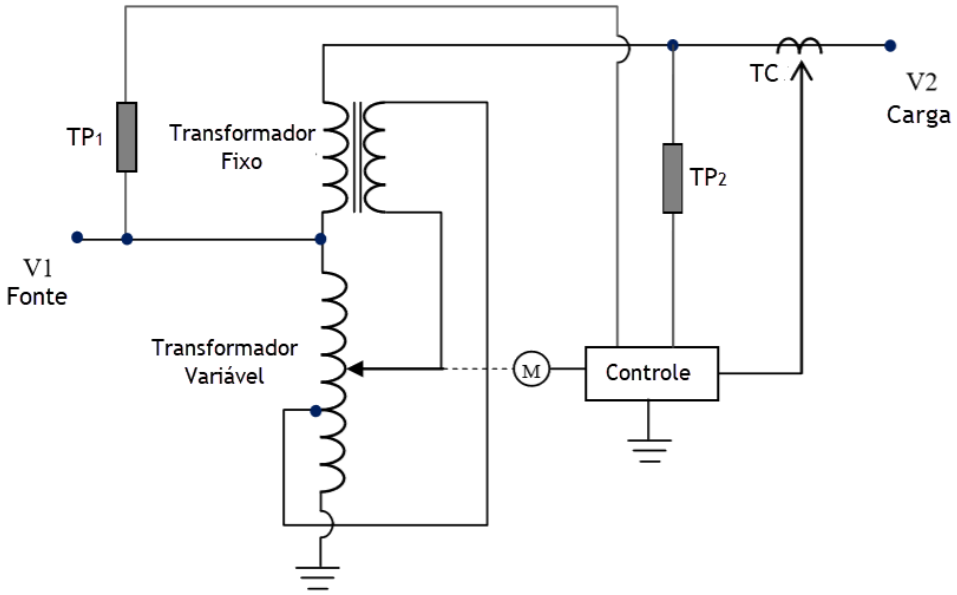
FONTE: AL-SABOUNCHI, 2011, p. 21.

Na Figura 5 temos o sistema de proteção de um alimentador radial com geração distribuída. Neste caso, a unidade de GD está injetando um fluxo de potência reverso em direção à subestação. Na hipótese deste fluxo reverso persistir para além do alimentador principal da rede de distribuição e atingir as subestações de distribuição, ele irá distorcer a operação dos relés unidirecionais ‘R1’ e ‘R2’. Os impactos sobre o relé de proteção são diversos e dependem da estrutura de conexão do relé no sistema. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 22, tradução nossa)

c) Impacto na Regulação de Tensão

O fluxo reverso de potência pode perturbar a operação de reguladores de tensão, pois muitos deles são dimensionados para um fluxo de energia fluindo da subestação para carga. Logo, parte-se do princípio de que o nível de tensão decaí ao longo da direção jusante do alimentador. Em um sistema de GD com fluxo reverso, a tensão irá decair na direção montante do alimentador, podendo interferir no controle dos reguladores de tensão. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 22, tradução nossa)

Figura 6 – Esquema de um Regulador de Tensão Bidirecional



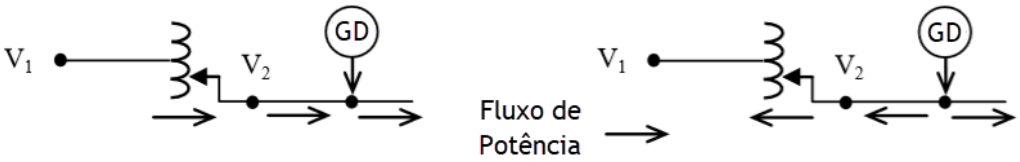
FONTE: AL-SABOUNCHI, 2011, p. 22.

Na Figura 6, observa-se o esquema de um regulador de tensão bidirecional. ‘TP1’ e ‘TP2’ são transformadores de potência que medem o nível de tensão em ambos os lados do regulador, já o transformador de corrente ‘TC’ mede a corrente presente na carga do regulador de tensão, enquanto que a direção do fluxo de potência é medida através da defasagem angular entre a tensão e a corrente medida na carga. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 22, tradução nossa)

No caso comum de existir uma subestação na fonte do regulador, o equipamento utilizará a informação recebida pelo transformador ‘TP2’ para regular ‘V2’, alterando a posição do *tap* no transformador variável para aumentar ou diminuir a tensão sobre o transformador fixo, aumentando ou diminuindo, respectivamente, a tensão na carga. Para o caso de o sistema ser alimentado pelo lado da carga por um alimentador adicional, por exemplo, o sistema fará o processo de forma análoga, só que fazendo uso das informações do transformador ‘TP1’ para regular a tensão ‘V1’. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 23, tradução nossa)

Tomando agora, uma hipótese de um sistema com um gerador distribuído na carga e uma subestação de distribuição na fonte do regulador de tensão, como apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Esquema de um Alimentador Radial com Regulador de Tensão e GD



FONTE: AL-SABOUNCHI, 2011, p. 23.

Para o caso da injeção de potência da unidade de GD não ser grande o suficiente para criar um fluxo reverso de potência em direção à subestação, o regulador operará normalmente para equilibrar a tensão em ‘V2’ a partir das informações recebidas em ‘TP2’. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 23, tradução nossa)

Contudo, no caso de existir um fluxo reverso em direção à subestação, o regulador entenderá, através da defasagem angular entre a tensão medida em ‘TP2’ e a corrente medida em ‘TC’, que a fonte está na carga do regulador e tentará, alterando o posicionamento do *tap* e usando como referência a medição em ‘TP1’, regular ‘V1’. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 23, tradução nossa)

Entretanto, a tensão em ‘V1’ é mantida constante devido à subestação, assim a tensão em ‘V2’ sofrerá com a variação constantemente até que o *tap* do regulador atinja seu limite, levando ‘V2’ para níveis indesejados de tensão. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 23, tradução nossa)

d) Impacto na Ampacidade do Alimentador e Perdas

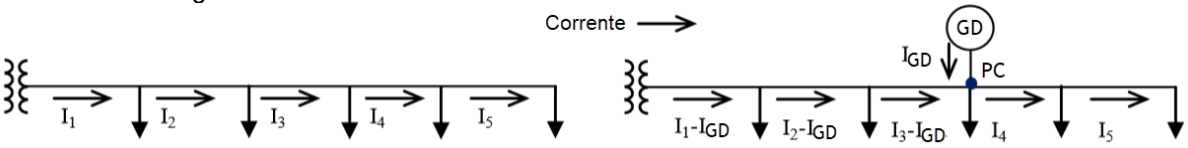
A implementação de um sistema de GD impacta a ampacidade do alimentador ao ponto que, como já mencionado, caso o nível de potência inserido no alimentador seja muito maior do que a demanda do mesmo, surja um fluxo reverso de corrente que pode exceder o limite de ampacidade do alimentador a montante, causando danos ao mesmo e a todo o sistema. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 24, tradução nossa)

Além dos efeitos gerados na ampacidade do alimentador, o fluxo de corrente impacta diretamente nas perdas do sistema que é proporcional ao fluxo de potência e possui proporção quadrática com o módulo da corrente, conforme equação abaixo.

$$\boldsymbol{Pe = R \,.\, |I|^2} \qquad (1)$$

A presença de GD na rede de distribuição local deve reduzir o módulo da corrente que flui pela linha e, por consequência, diminuir as perdas totais do alimentador, como está explicitado na Figura 8. Não obstante, da mesma forma que uma demasiada geração de energia por parte das unidades de geração distribuída causa um grande fluxo reverso de potência e afeta a ampacidade do alimentador, as perdas também sofrem com este grande fluxo reverso, o que resultará em um aumento no módulo do fluxo de corrente montante do alimentador, causando um novo aumento das perdas do sistema. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 24, tradução nossa)

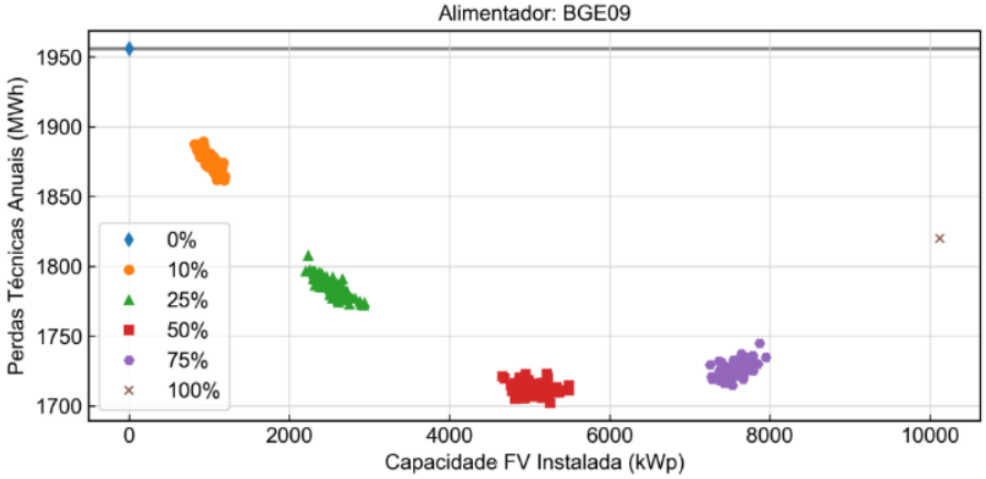
Figura 8 – Fluxo de Corrente em um Alimentador Radial com e sem GD



FONTE: AL-SABOUNCHI, 2011, p. 24.

Portanto, a relação perdas com potência gerada possui um perfil que se assemelha a uma parábola com concavidade inferior, ou seja, com o aumento da geração as perdas do alimentador tendem a diminuir até atingirem um valor mínimo a partir do qual elas passam a aumentar indefinidamente, como pode ser observado no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Relação Perdas Técnicas e Geração de uma Unidade de GD



FONTE: FREITAS, s.d, p. 11.

e) Impacto na Proteção de Ilhamento Passivo

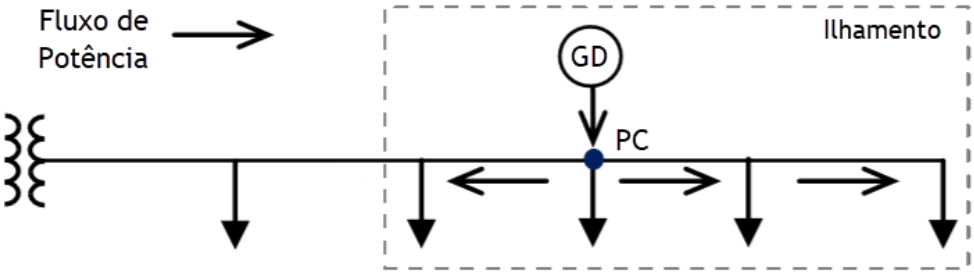
O ilhamento é um fator crítico em todo sistema de GD, pois ele é a condição de continuidade de fornecimento de potência ao alimentador, por parte da unidade de geração distribuída, mesmo com a interrupção da energização da linha. As consequências desta condição podem ser severas. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 24, tradução nossa)

Por exemplo, na hipótese de um desligamento da rede para a realização de manutenção, caso não exista nenhuma forma de proteção contra o ilhamento, uma equipe de manutenção que venha a ter contato com a linha, que se encontre na região de ilhamento, corre o risco de receber uma descarga elétrica, pois, uma vez que as unidades geradoras continuarão a fornecer energia para o alimentador, a linha se manterá energizada dentro desta região.

Para unidades geradoras que possuem partes inerciais móveis, como rotores, o ilhamento pode ser evitado através da aplicação de técnicas de proteção passivas com o uso de relés de tensão e frequência. Quando o ilhamento é formado, a discrepância entre a geração de potência da unidade de GD e a demanda do ponto de conexão do alimentador acarretará em uma variação na velocidade da unidade geradora, acelerante ou desacelerante, que resultará, respectivamente, no aumento ou redução da tensão e frequência que serão detectados por seus respectivos relés que desconectarão a unidade de geração distribuída. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 24-25, tradução nossa)

Já para unidades geradoras que não possuem movimento inercial, a tensão e frequência do gerador não sofrerão, facilmente, variações em seus valores com o desligamento da rede. Desta forma, o método de proteção anterior não será tão eficaz e a geração excedente da unidade de GD fluirá em ambos os sentidos do alimentador desernegizado, alimentando as cargas subsequentes até que toda a potência seja consumida pelas cargas conectadas à linha, retornando a tensão para zero, esta região do alimentador estará em ilhamento, conforme explicitado na a Figura 9. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 25, tradução nossa)

Figura 9 – Ilhamento Causado por uma Unidade de GD Solar



FONTE: AL-SABOUNCHI, 2011, p. 25.

Para o caso de geração solar, onde não há inércia no gerador, em muitos sistemas fica a cargo do próprio inversor realizar a proteção contra o ilhamento.

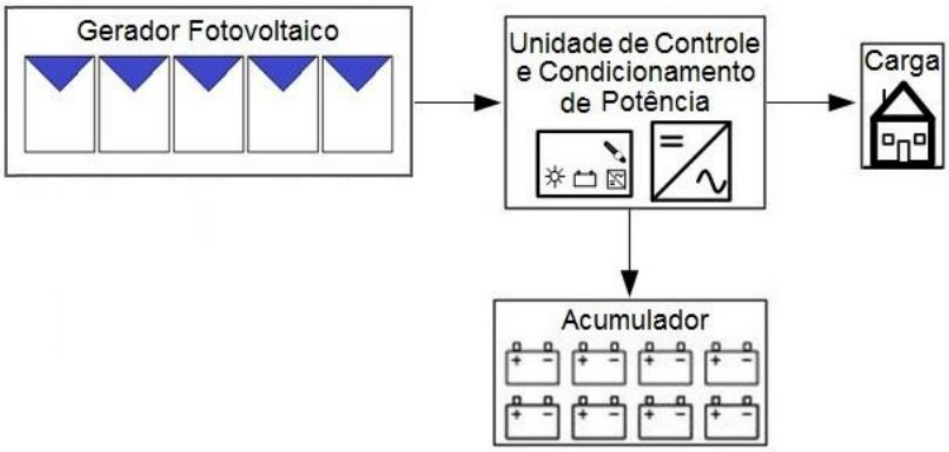
3.2 TECNOLOGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é obtida por meio da conversão da radiação solar em eletricidade com o auxílio de células fotovoltaicas que são a essência dessa tecnologia. Elas são compostas de materiais semicondutores dotados de substâncias capazes de lhes conceder propriedades semicondutivas, permitindo, assim, que a radiação possa ser convertida em energia elétrica a uma determinada eficiência. (PINHO; GALDINO, 2014, p. 50)

Normalmente constituída de silício (Si), mas também podendo ser produzida com telureto de cádmio (CdTe), Cobre-Índio-Gálio-Selênio (CIGS) ou eletrônica orgânica (OPV), cada um com sua respectiva eficiência, as células fotovoltaicas geram corrente elétrica ao permitir a circulação de elétrons em seu interior após absorverem a energia de fótons de luz solar.

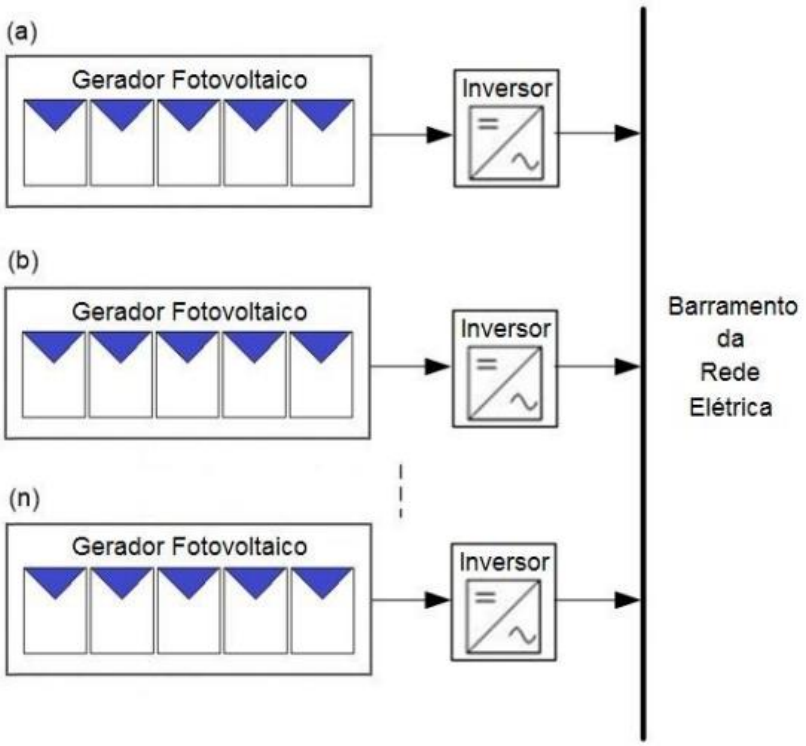
O módulo fotovoltaico é um conjunto de células em série que, por sua vez, são conectados em série entre si para atingir o nível de tensão desejado para o sistema. Existem dois sistemas fotovoltaicos, o isolado e o conectado à rede. O primeiro, além de utilizar um inversor para alimentar cargas CA, também faz uso de unidades de controle e armazenamento de energia para utilização posterior, enquanto que o segundo é conectado somente a um inversor e ligado diretamente à rede de distribuição, sendo esse o sistema utilizado em GD.

Figura 10 – Estrutura de um Sistema Fotovoltaico Isolado



FONTE: PINHO; GALDINO, 2014, p. 256.

Figura 11 – Estrutura de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede



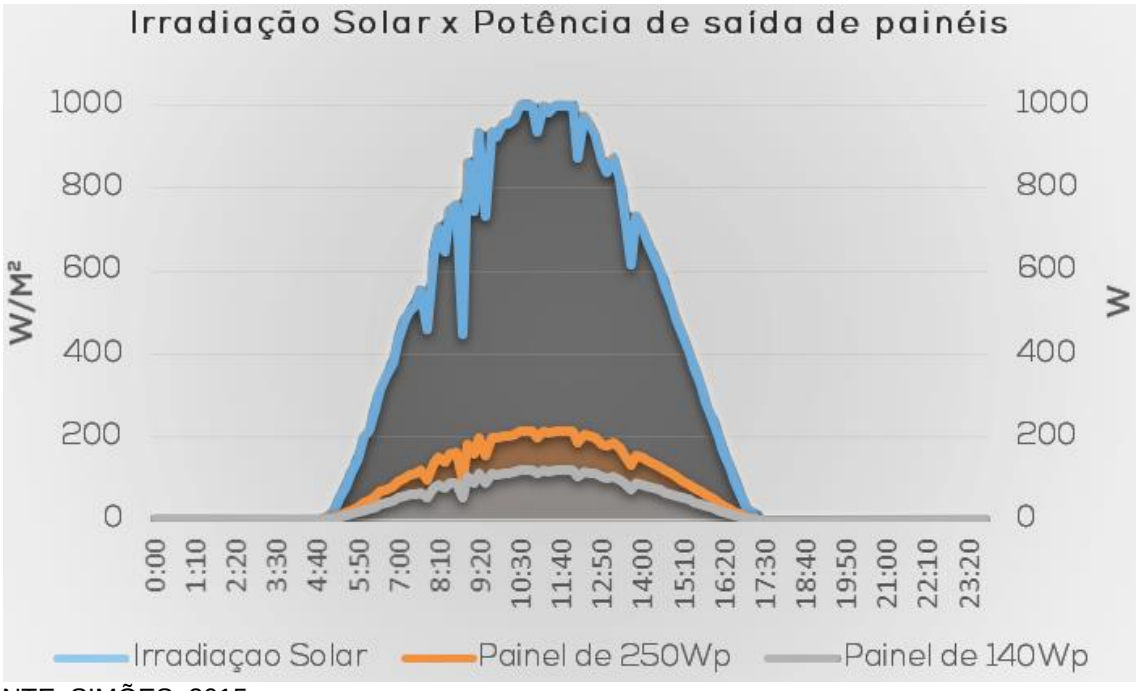
FONTE: PINHO; GALDINO, 2014, p. 257.

A capacidade da matriz fotovoltaica é dada em Wp (Watts-Pico), que corresponde à geração da matriz em temperatura ambiente de 25ºC e irradiação solar de 1000 W/m^2. Além disso, a potência efetivamente injetada na rede corresponde à potência CA convertida pelo inversor a partir da potência CC gerada pelo módulo fotovoltaico. Dessa forma, não só a geração do sistema fotovoltaico difere, normalmente, de sua capacidade, como também oscilará diariamente e sazonalmente de acordo com a

variação da irradiação solar e será impactado pela taxa de eficiência do inversor. (AL-SABOUNCHI, 2011, p. 26, tradução nossa)

Devido à oscilação presente na geração da matriz fotovoltaica ao longo do dia e época do ano, a compensação de demanda que a GD fotovoltaica fornece ao alimentador é inconstante, obtendo altos valores durante as horas do dia com maior irradiação solar, normalmente perto das 12 horas, e valores nulos durante o período noturno, como observado na Figura 12.

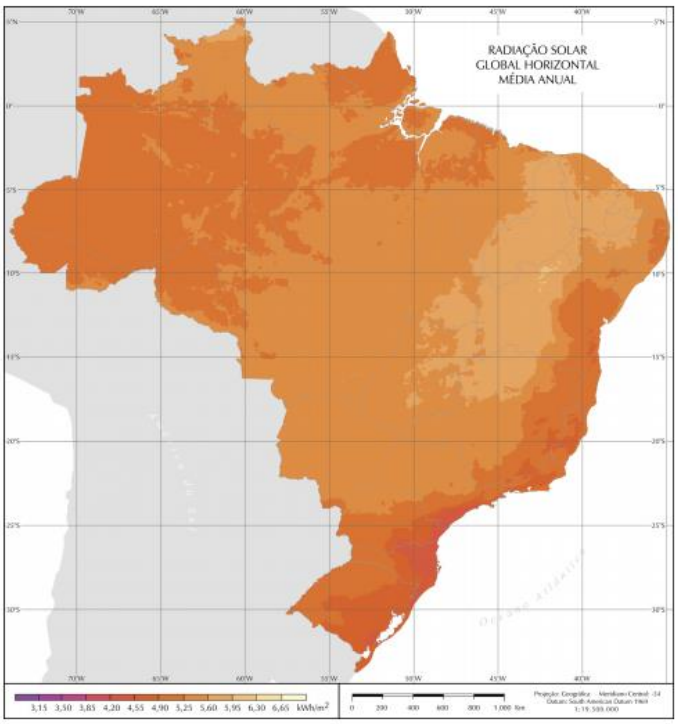
Figura 12 – Irradiação Solar e Potência Gerada por Módulos Fotovoltaicos Relacionados à Hora do Dia



FONTE: SIMÕES, 2015.

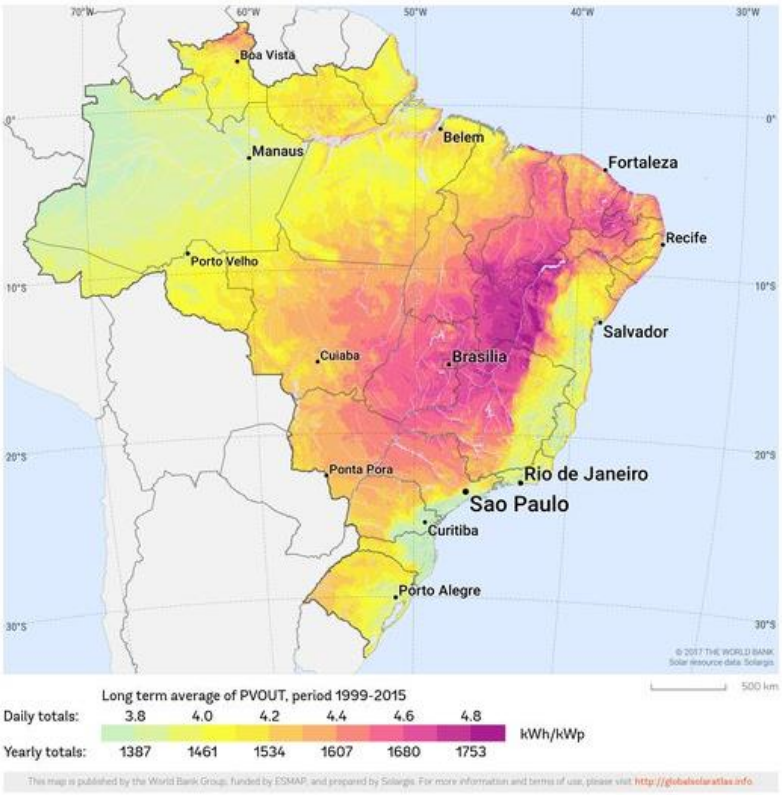
Na Figura 13 pode-se observar que o Brasil possui uma média anual de irradiação solar em um plano horizontal que pode variar de, aproximadamente, 4,2 a 6,3 kWh/m², o que o coloca na liderança de potencial de geração fotovoltaica se comparado aos muitos países europeus que possuem altos investimentos em energia solar, como a Alemanha, conforme pode ser constatado na Figura 14.

Figura 13 – Irradiação Horizontal Média Anual do Brasil



FONTE: PEREIRA et al, 2006, p. 34.

Figura 14 – Potencial Fotovoltaico do Brasil



FONTE: SOLARGIS, 2017.

4 MÉTODO DE ALOCAÇÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Devido aos vários impactos, já elencados anteriormente, que uma unidade de geração distribuída pode causar aos variados parâmetros de uma rede de distribuição, a alocação do sistema de GD é crucial para garantir não só a integridade do sistema e seus ativos, como também para atingir uma função objetivo a qual se deseja otimizar, como menor perdas, melhor perfil de tensão, diminuição da demanda no alimentador principal, etc.

Dessa maneira, para resolver a questão de alocação, muitos métodos clássicos e heurísticos já foram aplicados, como o fluxo de potência de Newton-Raphson, (RUEDA-MEDINA et al, 2013, p. 1, tradução nossa) as abordagens analíticas, o método de Lagrange, o método dos pontos interiores, o método de aproximações quadráticas, a busca tabu, a inteligência artificial, algoritmos evolutivos e os algoritmos genéticos. (ALMEIDA, 2016, p. 21)

Os métodos heurísticos são técnicas baseadas em processos intuitivos para a busca de uma boa solução para um problema ao um custo computacional aceitável. Elas não garantem que a solução encontrada seja a solução ótima e nem quão próximo dessa solução ela está. (SOUZA, 2011, p. 2)

Estes métodos são utilizados para resolver problemáticas complexas onde uma boa solução já é suficiente, ao invés de uma solução ótima absoluta, a qual só poderia ser encontrada após um gigantesco esforço computacional. (SOUZA, 2011, p. 2)

Assim, serão apresentados alguns métodos heurísticos comumente utilizados.

4.1 ALGORITMOS EVOLUTIVOS

O princípio básico de um algoritmo evolutivo é sempre o mesmo: dado uma população inicial de indivíduos soluções, eles são expostos ao processo de seleção natural, desencadeado por pressões ambientais que favorecem as melhores

soluções encontradas. Estas melhores soluções gerarão uma nova população, através de processos de recombinação e/ou mutação, e o processo de seleção natural ocorrerá novamente. (GABRIEL; DELBEM, s.d., p.1-2)

Três típicas abordagens independentes de algoritmo evolutivos são o algoritmo genético, a programação evolutiva e as estratégias evolutivas. (GABRIEL; DELBEM, s.d., p.1)

4.1.1 Algoritmo Genético

Almeida (2016, p. 33), assim como outros autores, sugere a utilização do algoritmo genético para reduzir as perdas de potência ativa de um alimentador analisado. Al-Sabounchi (2011, p. 45, tradução nossa) também faz menção a este método em estudos anteriores para reduzir as perdas do alimentador, embora mencione que, mesmo sendo eficaz, o método é custoso em processamento.

O algoritmo genético se baseia em uma analogia com o processo evolutivo natural para resolver problemas onde, a partir de um conjunto inicial aleatório (população inicial) de soluções (indivíduos) em potencial e uma função de aptidão ou *fitness,* é possível avaliar qualitativamente os indivíduos desta população, de forma a encontrar os que possuem as melhores características (genes) para resolver o problema. (SANCHO CAPARRINI, 2018, tradução nossa)

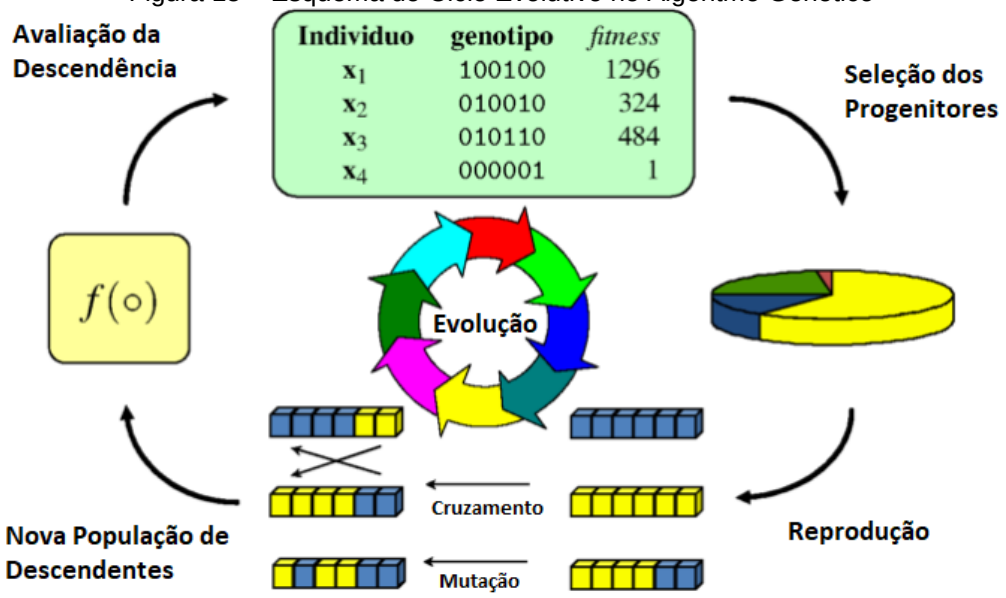
Partindo da população inicial gerada aleatoriamente, a função *fitness* avalia cada solução, dentre os quais muitos não servirão para resolver o problema. Contudo, alguns podem comprovar que possuem alguma característica genética que demonstra certa capacidade para resolvê-lo. Estes indivíduos são classificados com maior relevância pela *fitness* e são conservados para que possam se reproduzir entre si e gerar novos indivíduos que podem herdar, dos indivíduos soluções originais, as características genéticas consideradas boas para a solução do problema. (SANCHO CAPARRINI, 2018, tradução nossa)

Durante o processo de reprodução podem ser realizadas alterações aleatórias nos genes que compõe os novos indivíduos. Estas alterações representam as mutações genéticas que cada nova geração possuíra, ou seja, características genéticas diferentes das que compunham os dois indivíduos que o originaram. (SANCHO CAPARRINI, 2018, tradução nossa)

Após o processo, tem-se uma nova geração de indivíduos compostas pelos descendentes dos indivíduos soluções da população original que foram classificados como os melhores pela função *fitness* e sobreviveram para se reproduzir. Esta nova população passará pelo mesmo processo de avaliação pela função aptidão e reprodução dos melhores para criar uma nova geração com características genéticas ainda melhores para resolver o problema. (SANCHO CAPARRINI, 2018, tradução nossa)

Este processo evolutivo continuará de maneira cíclica até que o critério de parada seja alcançado. Na Figura 15 é mostrado o processo evolutivo cíclico do algoritmo genético.

Figura 15 – Esquema do Ciclo Evolutivo no Algoritmo Genético



FONTE: SANCHO CAPARRINI, 2018.

Embora pareçam não intuitivos, os algoritmos genéticos, mesmo que baseado na aleatoriedade de geração de possíveis soluções, mostraram ser um método de

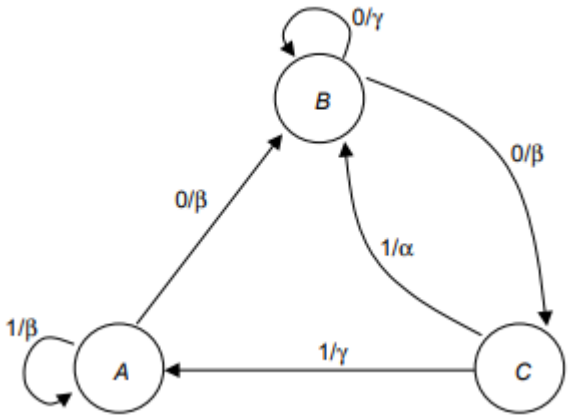
solução de problemas poderoso e que possui um enorme êxito ao trazer resultados muito próximos da solução ótima absoluta. (SANCHO CAPARRINI, 2018, tradução nossa)

4.1.2 Programação Evolutiva

A programação evolutiva também utiliza como base a evolução natural para solução de problemas, entretanto, diferentemente do algoritmo genético, a geração de novos indivíduos é realizada somente através da mutação, ou seja, é um processo de reprodução considerado assexuado. (GABRIEL; DELBEM, s.d., p. 8)

No inicio do processo, uma população é gerada aleatoriamente e é composta por indivíduos que são representados por máquinas de estados finitos, cuja estrutura é apresentada na Figura 16, que realiza o processo de uma sequência de símbolos de entrada que resultará na sequencial mudança de estado da máquina e em uma sequência de símbolos de saída. (GABRIEL; DELBEM, s.d., p. 8)

Figura 16 – Estrutura de uma Máquina de Estado



FONTE: CASTRO; VON ZUBER, s.d., p. 5.

Uma população de máquinas de estados está sujeita a uma sequência de símbolos observados que representa o ambiente ao qual ela está exposta. Cada saída é observada como uma predição da próxima entrada, assim, a qualidade da predição é averiguada ao comparar o valor da saída da máquina ao da entrada seguinte. (CASTRO; VON ZUBER, s.d., p. 6-7)

Após a avalição das predições de cada indivíduo, eles serão classificados, qualitativamente, por uma função de custo (*payoff*), de acordo com a qualidade do indivíduo de produzir as saídas esperadas para a solução do problema. (GABRIEL; DELBEM, s.d., p. 8)

Todos os indivíduos da população se reproduzirão, assexuadamente, através do processo de mutação, gerando novos indivíduos. Este processo de mutação é realizado através de mudança de um símbolo de saída, mudança de uma transição de estado, acréscimo de um novo estado, na remoção de um estado existente ou na mudança do estado inicial. (CASTRO; VON ZUBER, s.d., p.7)

Dentre esses novos indivíduos e os que compunham a população original, os k-melhores indivíduos, de acordo com a classificação do *payoff*, sobreviverão para formar a nova população e recomeçar o processo. O ciclo será encerrado quando um número máximo de gerações for atingido ou o resultado for satisfatório. (GABRIEL; DELBEM, s.d., p. 9)

4.1.3 Estratégias Evolutivas

A estratégia evolutiva é um algoritmo evolutivo que, na sua versão original, denominada (1+1)-EE, possui uma população composta por um único indivíduo formado por diversos genes que representam as diferentes dimensões do problema e cada indivíduo é definido por dois vetores: o primeiro constituído com os valores das dimensões do problema e outro constituído pelo desvio padrão destes valores. (GABRIEL; DELBEM, s.d., p. 9)

A reprodução é assexuada, baseada no processo de mutação, onde este único indivíduo irá gerar somente um único novo indivíduo. O operador de mutação é composto por uma distribuição Gaussiana com média zero e pelo desvio padrão do gene correspondente no indivíduo original que sofrerá alteração. O indivíduo progenitor e seu descendente competirão entre si pela sobrevivência, sendo que o

que demonstrar melhor solução prevalecerá para gerar um novo indivíduo. (GABRIEL; DELBEM, s.d., p. 9)

Este modelo original possui convergência extremamente lenta, assim, foram desenvolvidos dois novos métodos com maior quantidade de indivíduos, o (μ,λ)-EE e (μ + λ)-EE. No primeiro método fica definido que sempre μ progenitores irão ser eliminados e λ descendentes irão sobreviver, sem que haja competição entre os novos indivíduos e os originais. No segundo método haverá competição entre os μ indivíduos originais e λ descendentes, onde apenas um número μ de indivíduos sobreviverão. (GABRIEL; DELBEM, s.d., p. 9)

O processo de geração de novos indivíduos terá fim ao se atingir um número máximo especificado de gerações ou se um resultado satisfatório for encontrado.

4.2 BUSCA TABU

A Busca Tabu é um método heurístico de busca local, explorando as possíveis soluções ao se deslocar da solução atual para o seu melhor vizinho. Para evitar que a busca se mova em ciclo retornando para resultados já avaliados, o algoritmo cria uma lista tabu contendo os registros reversos dos movimentos mais recentes de busca já realizados e que não devem ser repetidos. Classicamente, esta lista possui tamanho fixo, sendo que toda vez que um novo movimento é registrado o mais antigo deve ser eliminado. (SOUZA, 2011, p. 21)

Dada uma solução inicial, o algoritmo irá explorar, a cada iteração, um subconjunto específico da vizinhança da solução atual. O melhor resultado, segundo a função de avaliação, encontrado neste subconjunto será a nova solução para a iteração seguinte, mesmo que ela seja pior que a solução anterior. Este critério visa uma busca com foco além do ótimo local. (SOUZA, 2011, p. 21)

A lista tabu diminui as chances de movimentos cíclicos de busca, contudo, ela pode impedir movimentos para soluções não visitadas anteriormente. Desta maneira, o

algoritmo utiliza a função de aspiração para retirar, em certas circunstâncias, o caráter proibido de um movimento. Sucintamente, caso a função aspiração verifique que um movimento tabu pode levar a uma solução que seja melhor do que a melhor solução registrada, o algoritmo permitirá a realização do movimento. (SOUZA, 2011, p. 21)

Existem duas regras que interrompem o processo iterativo de um algoritmo de busca tabu, quando um certo número máximo de iterações é ultrapassado sem resultar em nenhuma melhor solução do que a já encontrada; ou quando a solução ótima atinge um limite inferior conhecido. (SOUZA, 2011, p. 21) Na Figura 17 é explicitado o algoritmo geral de uma busca tabu.

Figura 17 – Algoritmo Geral de uma Busca Tabu

procedimento $BT(f(.), N(.), A(.), |V|, f_{min}, |T|, BTmax, s)$
1 $s^\star \leftarrow s$; {Melhor solução obtida até então}
2 $Iter \leftarrow 0$; {Contador do número de iterações}
3 $MelhorIter \leftarrow 0$; {Iteração mais recente que forneceu $s^\star$}
4 $T \leftarrow \emptyset$; {Lista Tabu}
5 Inicialize a função de aspiração A;
6 enquanto $(f(s) > f_{min}$ e $Iter - MelhorIter \leq BTmax)$ faça
7 $Iter \leftarrow Iter + 1$;
8 Seja $s' \leftarrow s \oplus m$ o melhor elemento de $V \subseteq N(s)$ tal que
o movimento m não seja tabu $(m \notin T)$ ou
s' atenda a condição de aspiração $(f(s') < A(f(s)))$;
9 Atualize a lista tabu T;
10 $s \leftarrow s'$;
11 se $(f(s) < f(s^\star))$ então
12 $s^\star \leftarrow s$;
13 $MelhorIter \leftarrow Iter$;
14 fim-se;
15 Atualize a função de aspiração A;
16 fim-enquanto;
17 $s \leftarrow s^\star$;
18 Retorne s;
fim BT;

FONTE: SOUZA, 2011, p. 22.

4.3 COLÔNIA DE FORMIGAS

É outro método heurístico que simula o comportamento de um conjunto de formigas que agem de forma cooperativa para solucionar um problema de otimização. Esta cooperação é dada fazendo uso de feromônios que cada formiga deposita ao realizar um movimento no espaço de busca. (SOUZA, 2011, p. 43)

Em suma, inicialmente, uma colônia de formigas realiza o seu movimento de forma assíncrona e concorrente pelo espaço de busca. Este movimento é baseado nas trilhas de feromônios e informações heurísticas. Ao realizarem seu percurso, elas construíram novas soluções para o problema em questão, neste processo, a formiga faz uma avaliação da solução, estando ela em processo de criação ou já finalizada, e deposita uma trilha de feromônio nas conexões e componentes utilizados para gerar a solução. Esta trilha servirá como guia para as buscas seguintes de outras formigas. (SOUZA, 2011, p. 43-44)

Esta trilha deixada no caminho que levou até a geração de boas soluções sofrerá um processo de evaporação com o tempo, ou seja, a diminuição da quantidade de feromônios presentes. Este procedimento tem como objetivo o “esquecimento” de uma rota antiga para incentivar a criação de novas rotas. (SOUZA, 2011, p. 44)

O processo terminará quando, após um número máximo de iterações, não ocorrer nenhuma alteração na melhor solução encontrada. Na Figura 18 é apresentado o algoritmo geral da técnica de colônia de formigas. (SOUZA, 2011, p. 45)

Figura 18 – Algoritmo Geral de uma Colônia de Formigas

procedimento *ColoniaFormigas*
1 Seja Q e Γ_0 constantes;
$f^* \leftarrow \infty$;
2 Faça $\Delta\Gamma_{ij} \leftarrow 0$ e $\Gamma_{ij} \leftarrow \Gamma_0$ para todo arco (i,j);
3 Para (cada formiga $k = 1, \cdots, m$) faça
(a) Selecione a cidade inicial para a k-ésima formiga
(b) Obtenha uma rota R^k para cada formiga k
(c) Seja L^k o comprimento da rota R^k
(d) se ($L^k < f^*$) então $s^* \leftarrow R^k$ e $f^* \leftarrow f(s^*)$
(e) Calcule a quantidade de rastro deixado pela formiga k:
se (arco (i,j) pertence à rota R^k)
então $\Delta\Gamma_{ij}^k \leftarrow d_{ij} \times Q/L^k$
senão $\Delta\Gamma_{ij}^k \leftarrow 0$
fim-se
(f) Faça $\Delta\Gamma_{ij} \leftarrow \Delta\Gamma_{ij} + \Delta\Gamma_{ij}^k$
4 fim-para;
5 Faça $\Gamma_{ij} \leftarrow (1-\rho) \times \Gamma_{ij} + \Delta\Gamma_{ij} \quad \forall\,(i,j)$
6 se (a melhor rota s^* não foi alterada nas últimas $IterMax$ iterações)
7 então $PARE$: s^* é a melhor solução
8 senão Retorne ao Passo 3
9 fim-se
fim *ColoniaFormigas*;

FONTE: SOUZA, 2011, p. 45.

4.4 BUSCA EXAUSTIVA

É um método heurístico de otimização extremamente bruto que consiste numa busca completa de todas as soluções possíveis, com o objetivo de se encontrar o ótimo universal dentre estas soluções.

O funcionamento dele é bem simples: definindo uma problemática, o método testará todas as soluções conhecidas para o problema, fazendo o registro constante da melhor solução encontrada. Ao encerrar o processo, como a busca verificou todas as possíveis soluções, é garantido que o resultado retornado como a solução ótima é de fato o ótimo universal do problema.

O processamento computacional para esses tipos de busca, dependendo do problema que se deseja solucionar, pode ser extremamente custoso, sendo aconselhável que se faça uso de restrições na solução para diminuir o universo de soluções possíveis onde as buscas serão realizadas.

5 METODOLOGIA

A proposta do presente estudo é desenvolver variações de um algoritmo para a alocação otimizada de unidades geradoras distribuídas em um alimentador de distribuição primário, visando atender uma função objetivo de otimização de um parâmetro específico do sistema.

No caso deste estudo em particular, os parâmetros analisados são a perdas de potência ativa do alimentador. Assim, nesta seção, será apresentada toda a metodologia utilizada para definir tanto os pontos de conexão dos geradores distribuídos, quanto a potência injetada nos mesmos, para que as perdas da linha sejam levadas à vizinhança do mínimo ótimo.

Primeiramente, antes de se apresentar a metodologia em si, devem ser definidas as restrições presentes no estudo.

5.1 RESTRIÇÕES

As principais restrições do projeto são pontuadas e discutidas abaixo:

a) Parâmetros Analisados

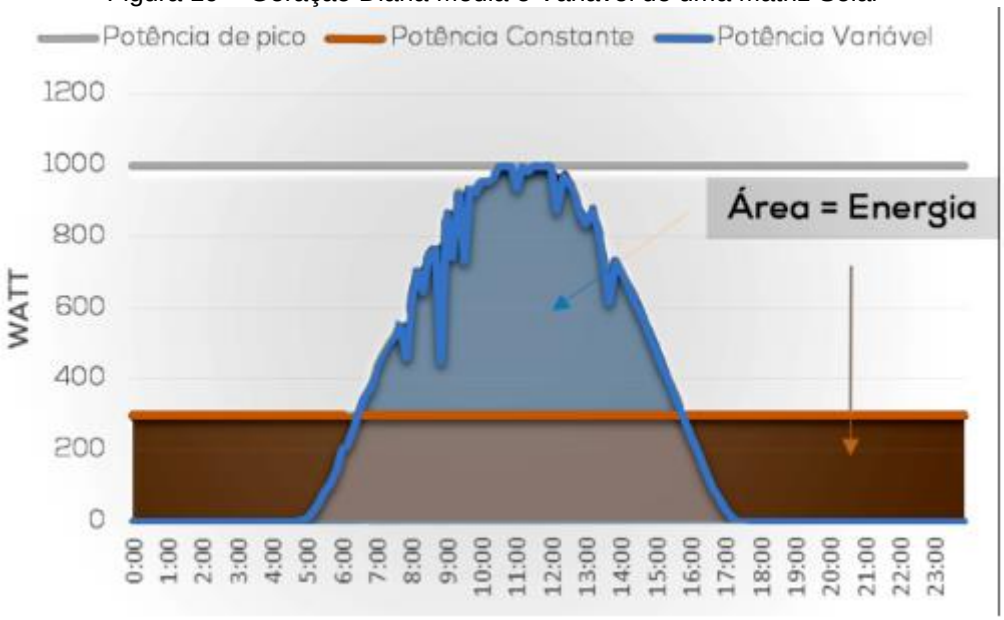
Embora as técnicas de alocação permitam avaliar funções multiobjetivos de otimização, como, por exemplo, a alocação de geradores visando melhorar o perfil de tensão; reduzir custos de operação; e perdas de potência ativa do sistema em geral, este estudo, como já discutido, se restringirá a desenvolver um algoritmo de alocação de gerador, tendo como único parâmetro avaliado as perdas de potência ativa do sistema. Todavia, uma expansão futura do estudo para atender multiobjetivos de aperfeiçoamento é considerada e será formalmente explicitada nas conclusões.

b) Tecnologia de Geração Distribuída e Fluxo de Potência

A tecnologia de GD utilizada será a fotovoltaica, que possui grande sazonalidade em sua produção energética, tanto durante um mesmo dia, quanto durante os diferentes meses do ano. Porém, para o estudo, será considerada uma geração média constante diária das unidades fotovoltaicas equivalente à quantidade de energia gerada pela unidade durante o dia.

A demanda de energia do alimentador, que também possui grande variação durante as horas de um dia, estará, igualmente, baseado neste mesmo conceito médio. Na Figura 19 é explicitado o conceito de uma geração solar média diária, a qual é equivalente, em quantidade de energia, à geração variável diária da matriz.

Figura 19 – Geração Diária Média e Variável de uma Matriz Solar



FONTE: SIMÕES, 2015.

Também vale ressaltar que serão abstraídas todas as perdas e parâmetros internos das unidades de GD, como as perdas no inversor, perdas no cabeamento, sistemas de controle e perdas de geração. Ademais, os valores de potência inseridos na rede apresentadas no estudo corresponderão às potências de saída dos inversores.

Ao final do projeto será apontada a possibilidade de futuro desenvolvimento do estudo para abranger a sazonalidade de geração e carga do sistema além dos parâmetros internos das unidades de GD.

c) Utilidade

Vale ressaltar que a otimização do sistema é desenvolvida do ponto de vista do detentor da rede de distribuição, dessa maneira, para o caso de uma implantação de um sistema de GD em um alimentador existem duas possibilidades:

1. O detentor das unidades geradoras também é o detentor da rede de distribuição, ou seja, ele está livre para alocar suas unidades geradoras em qualquer ponto da rede definido como ideal para cumprir seu objetivo. (RUEDA-MEDINA et al., 2013, p. 2, tradução nossa)
2. As unidades geradoras não pertencem ao detentor da rede, assim sendo, o detentor da rede pode incentivar que os pontos de geração sejam alocados em locais considerados apropriados para a otimização do sistema. (RUEDA-MEDINA et al., 2013, p. 2, tradução nossa)

Embora o segundo caso seja muito mais frequente em uma rede de distribuição convencional, existem casos em que o detentor da rede e da unidade de GD é o mesmo, por exemplo, nas redes de distribuição internas de grandes companhias e nos campus de universidades. Mesmo para o segundo caso, o estudo possui validade como forma de incentivo e direcionamento. Por exemplo, para um caso da Prefeitura de uma cidade que desejar instalar pontos de geração distribuída para diminuir os custos de iluminação pública, o detentor da rede de distribuição pode indicar os melhores pontos na rede para que as unidades sejam instaladas.

Neste estudo, a simulação é baseada no primeiro caso mencionado acima, em que o detentor das unidades de geração e da rede é o mesmo.

d) Rede de Distribuição e Demanda

A rede de distribuição considerada no estudo é trifásica com características físicas idênticas, além de demanda constante e equilibrada entre as fases. É considerado que a primeira barra da rede está conectada diretamente a uma subestação ou a um regulador de tensão. Devido ao tamanho reduzido, as impedâncias mútuas entre as fases e as impedâncias em paralelo da linha serão desconsideradas no fluxo de potência.

Assim, a rede trifásica pode ser reduzida em uma rede monofásica simples contendo somente a impedância de linha série e com tensão na primeira barra constante e fixada no valor nominal do sistema.

5.2 SOLUÇÃO DO PROBLEMA

A metodologia de solução do problema é dividida em quatro etapas principais: o levantamento das características da rede que será utilizada para análise; a realização do fluxo de potência; o cálculo de perdas de potência ativa do alimentador; e a aplicação dos algoritmos de alocação otimizada para definir os pontos de conexão e níveis de geração ideais das unidades de GD para minimização das perdas do sistema.

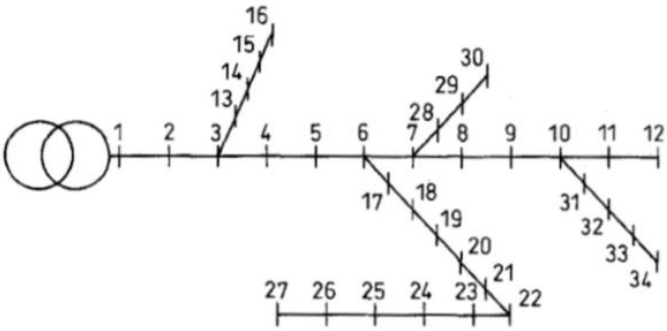
5.2.1 Rede de Distribuição

Para realizar o processo de alocação ótima das unidades geradoras, as primeiras e mais importantes informações necessárias são as características físicas e operacionais da rede de distribuição sobre a qual será feita a análise.

O alimentador utilizado é radial trifásico de 34 barras, com demanda média constante durante todo o dia e equilibrada entre as três fases. Salienta-se que as impedâncias em paralelo e mútuas são desconsideradas, sendo então apreciadas

somente as impedâncias série de linha. O esquema do alimentador utilizado é observado na Figura 20.

Figura 20 - Configuração da Rede de Distribuição Primária



FONTE: CHIS; SALAMA; JAYARAM, 1997, p. 227.

Na Tabela 2 estão apresentados os dados físicos e operacionais do alimentador, enquanto que, no Gráfico 4, são mostradas as demandas ativas de consumo em cada barra.

Tabela 2 - Dados da Rede de Distribuição

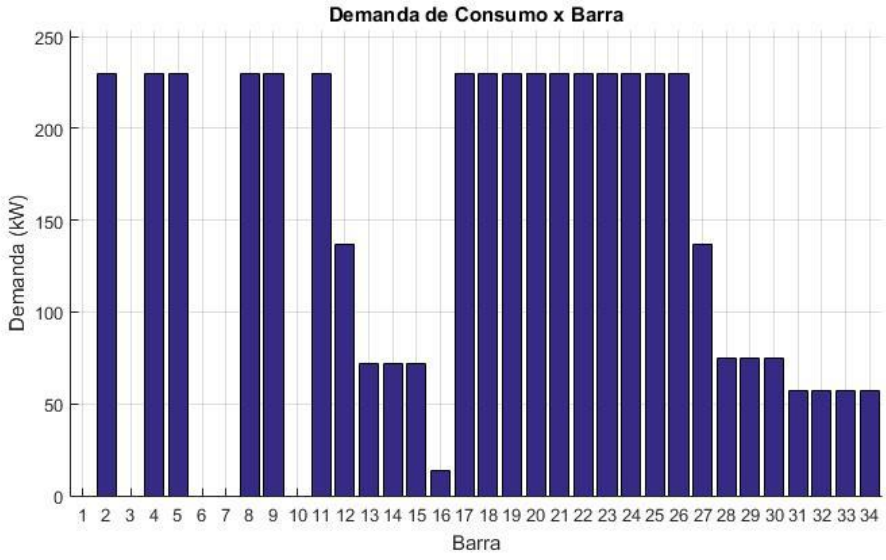
Barra	Carga		Impedância Série da Linha		Comprimento da Linha (km)
	P (kW)	Q (kVar)	r (Ω/km)	x (Ω/km)	
1	0	0	-	-	-
2	230	142.5	0.195	0.08	0.6
3	0	0	0.195	0.08	0.55
4	230	142.5	0.299	0.083	0.55
5	230	142.5	0.299	0.083	0.5
6	0	0	0.299	0.083	0.5
7	0	0	0.524	0.09	0.6
8	230	142.5	0.524	0.09	0.4
9	230	142.5	0.524	0.09	0.6
10	0	0	0.524	0.09	0.4
11	230	142.5	0.524	0.09	0.25
12	137	84	0.524	0.09	0.2
13	72	45	0.524	0.09	0.3
14	72	45	0.524	0.09	0.4
15	72	45	0.524	0.09	0.2
16	13.5	7.5	0.524	0.09	0.1
17	230	142.5	0.299	0.083	0.6
18	230	142.5	0.299	0.083	0.55
19	230	142.5	0.378	0.086	0.55

FONTE: Produção do próprio autor.

Barra	Carga		Impedância Série da Linha		Comprimento da Linha (km)
	P (kW)	Q (kVar)	r (Ω/km)	x (Ω/km)	
20	230	142.5	0.378	0.086	0.5
21	230	142.5	0.378	0.086	0.5
22	230	142.5	0.524	0.09	0.5
23	230	142.5	0.524	0.09	0.5
24	230	142.5	0.524	0.09	0.6
25	230	142.5	0.524	0.09	0.4
26	230	142.5	0.524	0.09	0.25
27	137	85	0.524	0.09	0.2
28	75	48	0.524	0.09	0.3
29	75	48	0.524	0.09	0.3
30	75	48	0.524	0.09	0.3
31	57	34.5	0.524	0.09	0.3
32	57	34.5	0.524	0.09	0.4
33	57	34.5	0.524	0.09	0.3
34	57	34.5	0.524	0.09	0.2

FONTE: Produção do próprio autor.

Gráfico 4 – Demanda Ativa de Consumo do Alimentador por Barra



FONTE: Produção do próprio autor.

Também é importante explicitar os valores bases de tensão e potência do sistema, os quais são, respectivamente, 11 kV e 10MVA.

Todas essas informações servirão para dar-se início à próxima etapa, que consiste na análise do fluxo de potência da rede visando calcular seus valores de perdas de potência ativa.

5.2.2 Fluxo de Potência

O fluxo de potência é composto por equações algébricas não-lineares, dessa forma, faz-se necessário utilizar métodos de resolução destes tipos de equações algébricas. Alguns métodos comumente utilizados são o Gauss-Seidel, Newton-Raphson, Quase-Newton e Backward-Forward. (RUEDA-MEDINA, s.d.)

Todos os métodos mencionados são iterativos, ou seja, são métodos que, a partir de um valor inicial pré-definido 'x^0', realizam-se várias operações algébricas a fim de se calcular um novo valor de entrada 'x^1' para o sistema. O novo valor calculado é realimentado como entrada no sistema e o processo se repetirá por múltiplas iterações até que um valor de tolerância mínimo entre a diferença dos dois últimos valores calculados seja atingida. O método iterativo é explicitado matematicamente na equação abaixo.

$$\boldsymbol{A}.\boldsymbol{x} = \boldsymbol{b} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{M} + \boldsymbol{N} \tag{3}$$

Sendo 'A', 'M' e 'N' uma matriz (w, y); sendo 'x' um vetor $(y, 1)$; sendo 'b' um vetor $(w, 1)$; sendo 'w' e 'y' números naturais; e sendo 'M' invertível, substituindo a equação (3) na (2), tem-se:

$$(\boldsymbol{M} + \boldsymbol{N}).\boldsymbol{x} = \boldsymbol{b} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{M^{-1}}.\boldsymbol{b} - \boldsymbol{M^{-1}}.\boldsymbol{N}.\boldsymbol{x} \tag{5}$$

Dessa forma, para um valor inicial pré-definido '$\mathrm{x}^{(0)}$', a equação do método iterativo é:

$$\boldsymbol{x^{(k+1)} = M^{-1}.b - M^{-1}.N.x^{(k)}} \quad (6)$$

As iterações se repetiram até que o seguinte critério seja atendido:

$$\boldsymbol{x^{(k+1)} - x^{(k)} \leq \varepsilon} \quad (7)$$

Onde 'ε' é a tolerância mínima definida para o método. (MÉTODOS..., acesso em: 10 nov. 2018)

O método utilizado para este estudo foi o Backward-Forward, cujo equacionamento matemático é mostrado a seguir.

Em um sistema radial com 'B' barras, para toda barra destino 'n', a jusante, existe somente uma única barra origem 'm', a montante, na rede de distribuição. Desta maneira, para que o cálculo do fluxo de potência tenha início, primeiramente, define-se o valor de tolerância mínimo 'ε', que, neste caso, foi definido em 10^{-5}; e, ao receber o valor base de tensão e potência, 'V_b' e 'S_b', respectivamente, calculam-se os valores de base para impedância e corrente pelas seguintes fórmulas:

$$\boldsymbol{Z_b = \frac{V_b^2}{S_b}} \quad (8)$$

$$\boldsymbol{I_b = \frac{S_b}{V_b.\sqrt{3}}} \quad (9)$$

Em seguida, recebe os valores de demanda de cada barra e de impedâncias de cada ramo do alimentador e converte-os para os seus valores em pu através das seguintes equações:

$$\boldsymbol{z_{m,n}^{pu} = \frac{Z_{m,n}}{Z_b}} \quad (10)$$

$$\boldsymbol{S_m = P_m + j.Q_m} \quad (11)$$

$$\boldsymbol{s_m^{pu} = \frac{S_m}{S_b}} \quad (12)$$

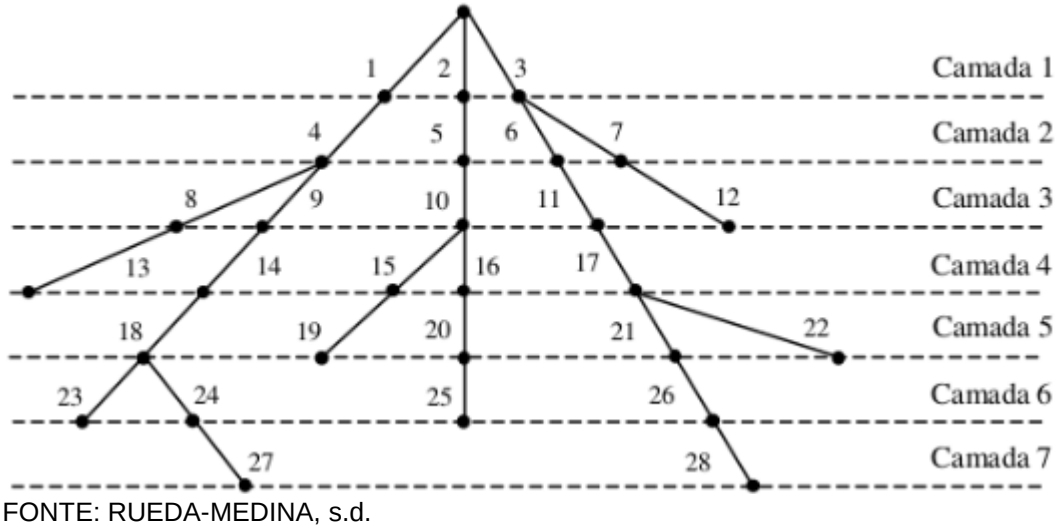
Com os valores em pu de demanda das barras e impedância de linha, define-se o valor inicial '$E_b^{(0)}$' para tensão e ângulo em todas as barras do alimentador, que, por padrão, é definido como $\underline{1/0°}\ pu$.

Tomado um valor inicial dá-se início às iterações, propriamente ditas. Toda iteração seguirá o mesmo conjunto de equações. Primeiramente, se calculam os valores de corrente injetada em cada barra do alimentador, a partir dos valores de tensão das barras calculados na iteração anterior e da demanda de cada barra segundo a equação abaixo:

$$\boldsymbol{I_{i_m}^{(k)} = \overline{\left(\frac{s_m^{pu}}{E_{b_m}^{(k-1)}}\right)}} \tag{13}$$

Após, se calculam os valores de corrente de fluxo em cada ramo do alimentador. A corrente que flui pelo ramo com origem na barra 'm', a montante; para a barra 'n', a jusante, é dada pela soma da corrente injetada na barra 'n' com a somatória das correntes de fluxo dos ramos que possuem a barra 'n' como origem. Esse cálculo é feito sempre a partir das últimas barras do alimentador, as localizadas mais a jusante, em direção à primeira barra do mesmo, a localizada mais a montante, conforme Figura 21.

Figura 21 – Divisão de um Alimentador em Camadas de Posicionamento



FONTE: RUEDA-MEDINA, s.d.

Assim, sendo 'L' o conjunto das barras que possuem 'n' como barra origem, a corrente de fluxo é calculada pela seguinte fórmula:

$$\boldsymbol{I}_{\boldsymbol{f_{m,n}}}^{(\boldsymbol{k})} = \boldsymbol{I}_{\boldsymbol{i_n}}^{(\boldsymbol{k})} + \sum_{\boldsymbol{l \in L}} \boldsymbol{I}_{\boldsymbol{f_{n,l}}}^{(\boldsymbol{k})} \tag{14}$$

Com o cálculo das correntes de fluxo em cada ramo do alimentador são definidos os novos níveis de tensão das barras da rede. Esse cálculo é realizado subtraindo a tensão na barra origem 'm', a montante, pela queda de tensão no ramo que a conecta a barra destino 'n', a jusante.

Este cálculo é realizado no sentido contrário do cálculo das correntes de fluxo, começando pela primeira barra do alimentador em direção às suas últimas barras. Lembrando que, por definição, a primeira barra está conectada a uma subestação ou a um regulador, de modo que a tensão nela sempre será a nominal com ângulo zero, independentemente de quantas iterações ocorram. Assim, o cálculo das novas tensões de barras é dado por:

$$\boldsymbol{E}_{\boldsymbol{b_n}}^{(\boldsymbol{k})} = \boldsymbol{E}_{\boldsymbol{b_m}}^{(\boldsymbol{k})} - \boldsymbol{z}_{\boldsymbol{m,n}}^{\boldsymbol{pu}} . \boldsymbol{I}_{\boldsymbol{f_{m,n}}}^{(\boldsymbol{k})} \tag{15}$$

Onde '$E_{b_1}^{(k)}$' será sempre igual a $1\underline{/0°}\ pu$.

A última etapa do método iterativo é verificar se a tolerância máxima foi respeitada. Para isso, com os valores calculados de tensão e de corrente injetada em cada barra, calculam-se as respectivas demandas de cada barra e verifica-se a diferença desse valor com as demandas já conhecidas de cada barra.

Caso a diferença de demanda ativa e a de demanda reativa de cada barra do sistema sejam menores ou iguais à tolerância especificada, a iteração terminará e os valores de tensão, a corrente injetada e a corrente de fluxo, calculados nessa última iteração, serão usados para o cálculo das perdas no alimentador. Caso contrário, os níveis de tensão das barras, calculados nessa iteração, servirão como entrada para o cálculo das correntes injetadas da iteração seguinte e o ciclo iterativo recomeçará.

$$\Delta \boldsymbol{S}_{\boldsymbol{m}}^{(\boldsymbol{k})} = \boldsymbol{E}_{\boldsymbol{b}_{\boldsymbol{m}}}^{(\boldsymbol{k})} . \overline{\boldsymbol{I}_{\boldsymbol{i}_{\boldsymbol{m}}}^{(\boldsymbol{k})}} - \boldsymbol{s}_{\boldsymbol{m}}^{\boldsymbol{pu}} \quad (16)$$

$$\Delta \boldsymbol{S}_{\boldsymbol{m}}^{(\boldsymbol{k})} = \Delta \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{m}}^{(\boldsymbol{k})} + \boldsymbol{j} . \Delta \boldsymbol{Q}_{\boldsymbol{m}}^{(\boldsymbol{k})} \quad (17)$$

$$\Delta \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{m}}^{(\boldsymbol{k})} \leq \boldsymbol{\varepsilon} \quad (18)$$

$$\Delta \boldsymbol{Q}_{\boldsymbol{m}}^{(\boldsymbol{k})} \leq \boldsymbol{\varepsilon} \quad (19)$$

5.2.3 Perdas de Potência Ativa

Finalizado o fluxo de potência e tendo domínio sobre os valores de correntes de fluxo e impedância série em cada ramo do alimentador, será dado início ao cálculo de perdas do alimentador. O cálculo é bem simples e é dividido em duas etapas:

a) Cálculo das Perdas em Cada Ramo:

O cálculo das perdas de potência ativa em cada ramo é feito ao multiplicar a resistência do ramo pelo quadrado do módulo da corrente de fluxo deste ramo.

$$\boldsymbol{Z}_{\boldsymbol{m,n}} = \boldsymbol{z}_{\boldsymbol{m,n}}^{\boldsymbol{pu}} . \boldsymbol{Z}_{\boldsymbol{b}} \quad (20)$$

$$\boldsymbol{Z}_{\boldsymbol{m,n}} = \boldsymbol{R}_{\boldsymbol{m,n}} + \boldsymbol{j} . \boldsymbol{X}_{\boldsymbol{m,n}} \quad (21)$$

$$\boldsymbol{I}_{\boldsymbol{F}_{\boldsymbol{m,n}}} = \boldsymbol{I}_{\boldsymbol{f}_{\boldsymbol{m,n}}} . \boldsymbol{I}_{\boldsymbol{b}} \quad (22)$$

$$\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{m,n}}} = \boldsymbol{R}_{\boldsymbol{m,n}} . \left| \boldsymbol{I}_{\boldsymbol{F}_{\boldsymbol{m,n}}} \right|^{\boldsymbol{2}} \quad (23)$$

b) Cálculo das Perdas Totais:

Feito o cálculo das perdas em cada ramo, as perdas de potência ativa totais do alimentador são dadas pela somatória direta das perdas em todos os ramos do alimentador.

$$\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{T}} = \sum_{\boldsymbol{m}}^{\boldsymbol{B}} \left(\sum_{\boldsymbol{n}}^{\boldsymbol{B}} \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{m,n}}} \right) \quad (24)$$

O cálculo das perdas totais do alimentador servirá de referência para a análise qualitativa em todos os algoritmos de alocação otimizada que são utilizados neste estudo. Portanto, a última etapa do mesmo é, justamente, a utilização destes algoritmos para apontar a localização mais adequada dos geradores distribuídos.

5.2.4 Algoritmos de Alocação Otimizada

No referido estudo, para meios de comparação, foram utilizados quatro métodos diferentes de alocação de pontos de geração distribuída. O primeiro é denominado Método Exaustivo, que consiste na busca completa de todas as possibilidades de arranjo das unidades de GD para encontrar o ponto ótimo. Os outros três fazem uso de algoritmos genéticos, técnica de otimização que se baseia nos princípios evolutivos de Charles Darwin para alcançar uma função objetivo.

Todas as três técnicas que utilizam o conceito de algoritmo genético possuem uma mesma limitação de geração por ponto de conexão. A diferença entre elas está nas limitações complementares impostas. A primeira possui limitações físicas de quantidades de pontos de geração; a segunda possui tanto limitações físicas, quanto no valor total de geração; e a terceira tratará de um método misto com duas otimizações em série. A primeira etapa de otimização possui limitações no valor total de geração e a segunda etapa possui, adicionalmente, limitações físicas.

Cabe explicitar, no momento, que a limitação de geração por ponto de conexão comum a todos os três métodos baseado em algoritmo genético, para este estudo, foi definida em 50% da demanda ativa da rede analisada, que possui o valor de 4.636,5 kW. Cada método será apresentado mais afundo no decorrer desta seção.

5.2.4.1 Método Exaustivo

O Método Exaustivo é o mais simples de todos, contudo, é o menos prático e, dependendo do tamanho da rede e quantidade de pontos de geração, pode ser o

mais trabalhoso processualmente. Ele consiste em uma busca completa para alocação de unidades de GD, testando todas as possibilidades existentes de configuração do sistema, a partir de alguns parâmetros pré-definidos, com o objetivo de encontrar a configuração ótima.

Embora bruto e com a necessidade de limitações no número de pontos de geração, no valor total de geração e na geração por ponto de conexão, este método tem a vantagem de retornar a configuração ótima absoluta, dado que ele testará todas as configurações possíveis para um determinado caso.

Para que possa ser feita uma comparação entre o Método Exaustivo e os demais, ele possuirá a mesma limitação de 50% da demanda ativa na geração por ponto de conexão, que é aplicada aos demais métodos utilizados. Adicionalmente, a geração total das unidades acopladas também estará limitada, tendo que, obrigatoriamente, abranger 50% da demanda ativa do alimentador.

Antes de utilizar o método exaustivo, devem ser definidos todos os parâmetros de limitação e estes devem respeitar as limitações gerais mencionadas. Assim, ficam pré-definidos a quantidade de pontos de geração utilizados, a geração de cada um desses pontos, que deve ser menor ou igual a 50% da demanda ativa e sua somatória deve se igualar a 50% da demanda ativa. Um exemplo seria encontrar a configuração ótima no alimentador para 3 pontos de geração com níveis de geração distribuídos em 20%, 30% e 50% da geração total que é igual a 2.318,25 kW (50% da demanda ativa do alimentador).

Neste estudo a configuração ótima realizada foi para somente um único ponto de geração, cujo nível é de 100% da geração total que equivale a 50% da demanda ativa do sistema.

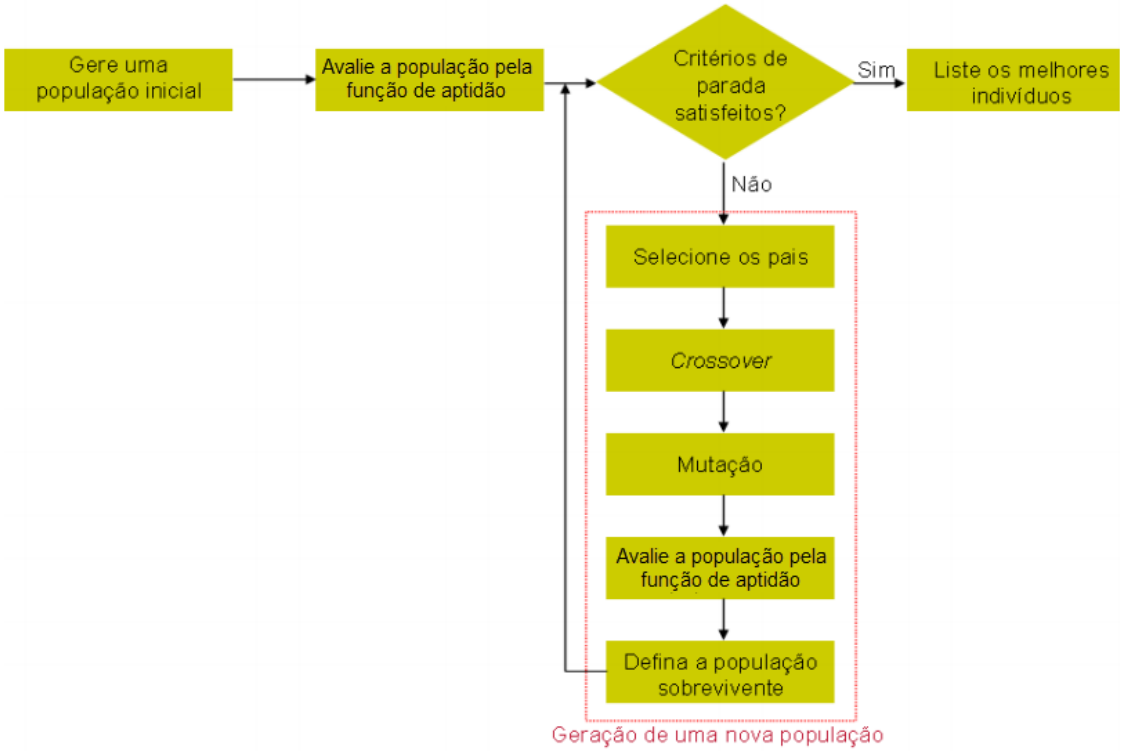
5.2.4.2 Métodos com Algoritmo Genético

Antes de se discutir cada um dos métodos individualmente, cabe apresentar os parâmetros e as definições do processo de otimização com algoritmo genético que é comum aos três métodos.

Todos os processos com algoritmo genético seguirão o mesmo esquema processual apresentado na Figura 22, no qual uma geração aleatória inicial é criada. Em seguida, é avaliada pela função *fitness* e depois é verificado se o critério de parada foi atingido; caso não tenha, alguns indivíduos da população original são selecionados para realização do processo de *crossover*, sendo que a quantidade desses indivíduos selecionados dependerá do fator de *crossover*. Após este último procedimento, os indivíduos não selecionados para o *crossover* sofrerão um processo de mutação aleatória, baseado em uma distribuição Gaussiana com média zero, com o intuito de diversificar as possíveis soluções do problema.

Por fim, todos os novos indivíduos serão avaliados pela função *fitness* e serão determinados quais dentre os antigos e os novos possuem as melhores características, de acordo com a avalição realizada, e sobreviverão para compor a próxima geração. Será, novamente, verificado o critério de parada e, se alcançado, o melhor indivíduo da nova geração será a solução do problema, caso contrário, o processo se repetirá.

Figura 22 – Fluxograma de Operação do Algoritmo Genético



FONTE: SOUZA, 2011, p. 33.

Na Tabela 3 estão apresentados alguns dos principais parâmetros processuais utilizados no algoritmo genético.

Tabela 3 – Dados do Processo de Otimização do Algoritmo Genético

Nº de Indivíduos na População	**200**
Fator de Crossover	**0.8**
Nº de Gerações	**100 x Nº de Variáveis**

FONTE: Produção do próprio autor.

Todos os processos serão restringidos de acordo com as limitações impostas em cada um dos métodos, por exemplo, se foi restringido que a soma das gerações de todos os pontos de geração será 50% da demanda ativa, qualquer novo indivíduo solução criado, tanto por mutação como por *crossover*, deve respeitar a restrição.

Para concluir, cabe comentar que todos os métodos possuem uma mesma restrição, onde cada ponto de geração deve injetar no máximo 50% da demanda ativa da rede. Para que soluções que descumpram tal restrição não sejam escolhidas, foi implementado um valor de penalidade nas funções *fitness* que se soma ao valor de perdas do alimentador. Este valor é zero caso a restrição seja cumprida e aumenta

linearmente quanto mais a geração ultrapassa o limite. No Gráfico 5 é mostrado o aumento do valor de Penalidade que é adicionado ao valor das perdas, ao passo que, a geração em um único ponto ultrapassa o limite definido de 50% da demanda ativa do alimentador.

Gráfico 5 – Penalidade nas Perdas em Relação à Razão da Geração no Ponto de Conexão com a Demanda Ativa

FONTE: Produção do próprio autor.

A seguir serão apresentadas as particularidades de cada método que se diferenciam entre si pelas suas funções *fitness* e restrições particulares.

5.2.4.2.1 Método com Restrição na Quantidade de Pontos de Geração

Neste método há somente a restrição na quantidade de pontos de geração, que devem ser definidos previamente. Definindo 'ng' como o número de pontos de geração distribuída que se deseja instalar no alimentador, cada indivíduo solução do algoritmo genético será composto por $ng + 4.ng$ genes (ou variáveis).

Os 'ng' primeiros genes possuem a restrição de serem sempre inteiros, podendo variar de '1' a 'B', sendo 'B' o número de barras do alimentador. Os '$4.ng$' genes seguintes são inteiros, podendo tomar o valor '0' ou '1' e cada agrupamento de 4

genes definirá o estado de geração de cada unidade de GD conectado a um ponto de geração. Estes estados são definidos de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 – Estado de Geração em um Ponto de Conexão no Alimentador

Estado	Porcentagem do Limite de Geração por PC	Porcentagem da Demanda Ativa do Alimentador
0000	0.00%	0.00%
0001	12.50%	6.25%
0010	25.00%	12.50%
0011	37.50%	18.75%
0100	50.00%	25.00%
0101	62.50%	31.25%
0110	75.00%	37.50%
0111	87.50%	43.75%
1000	100.00%	50.00%
1001	112.50%	56.25%
1010	125.00%	62.50%
1011	137.50%	68.75%
1100	150.00%	75.00%
1101	162.50%	81.25%
1110	175.00%	87.50%
1111	187.50%	93.75%

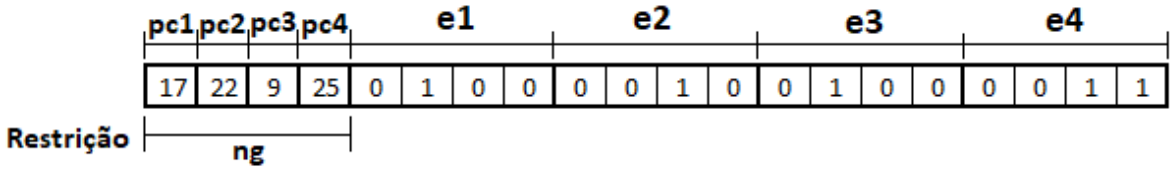
FONTE: Produção do próprio autor.

Para os pontos de conexão com estado de geração maior que 100% do limite de geração determinado são aplicadas as penalidades descritas anteriormente.

Neste método, embora haja limites nos pontos de conexão, não há restrições quanto ao valor total de potência injetada no alimentador, assim, embora cada PC não possa injetar, individualmente, mais de 100% do limite, todos os PC's somados podem injetar valores maiores que o limite.

No presente estudo foram feitas otimizações de alocação para o alimentador com 1 a 10 pontos de geração. Na Figura 23 é exemplificada uma solução de alocação ótima para quatro pontos de geração.

Figura 23 – Exemplo de Solução Apresentada pelo Primeiro Método para 4 Pontos de Geração



FONTE: Produção do próprio autor.

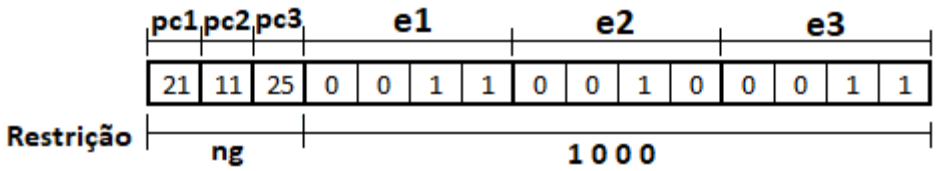
5.2.4.2.2 Método com Restrição na Quantidade de Pontos de Geração e Geração Total

O segundo método é análogo ao primeiro, tendo como diferencial somente a restrição adicional de geração total das unidades de GD. Ou seja, além de cada ponto de conexão dos geradores não poder injetar mais de 100% do limite de geração, a somatória da injeção de potência de todos os PC's deverá ser equivalente a este limite.

Desta forma, o número de genes de um indivíduo e o valor que cada um deles pode tomar são os mesmos do método anterior, o diferencial é que a somatória dos agrupamentos de 4 genes que determinam os estados de geração de um ponto de conexão de GD deve ser, obrigatoriamente, igual ao estado '1000' que equivale a 100% do limite.

Neste método, também, foram realizadas alocações ótimas com 1 a 10 pontos de geração. Na Figura 24 é apresentado um exemplo de indivíduo solução para uma configuração com 3 pontos de geração.

Figura 24 - Exemplo de Solução Apresentada pelo Segundo Método para 3 Pontos de Geração



FONTE: Produção do próprio autor.

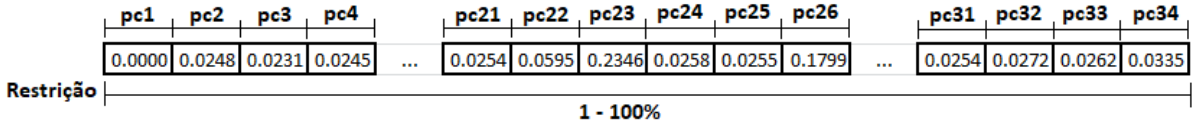
5.2.4.2.3 Método Misto

O terceiro e último método de alocação otimizada é o mais diferente dos três e consiste em duas aplicações de algoritmos genéticos diferentes em série. A primeira etapa possui somente a restrição de geração total das unidades de GD no alimentador apresentada no método anterior. A segunda etapa também possui esta restrição com o adicional de duas outras restrições: a de quantidade de pontos de geração e localização dos mesmos.

A primeira etapa é aplicada dando total liberdade para o algoritmo alocar geradores em quantas barras ele achar melhor, desde que respeitando que a geração de cada PC não pode ser maior que o limite e que a geração total das unidades de GD no alimentador deve ser igual ao limite, ou seja, 50% da demanda ativa do alimentador.

O resultado desta etapa, muito provavelmente, será uma solução com pontos de geração em todas as barras do alimentador, cuja somatória de todas as suas gerações deverá ser 100% do valor definido como limite. Entretanto, algumas barras possuirão maior geração que outras, de forma que podemos definir, qualitativamente, qual a relevância de cada barra para alcançar a função objetivo de minimização das perdas de potência ativa totais do alimentador. Na Figura 25 observa-se um exemplo de solução para a primeira etapa deste último método.

Figura 25 - Exemplo de Solução Apresentada pela Primeira Etapa do Terceiro Método



FONTE: Produção do próprio autor.

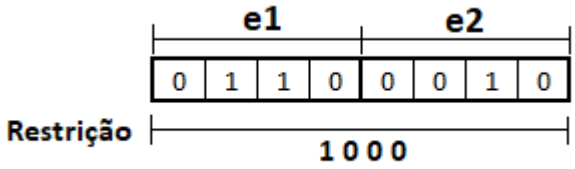
É baseado neste princípio que a segunda etapa irá operar. Primeiramente, faz-se necessário definir as barras de maior relevância para a otimização, que neste estudo serão consideradas todas as barras com geração igual ou superior a 75% da injeção de potência do ponto de geração com a maior contribuição.

Assim, tendo definido quais e quantas barras são consideradas relevantes para se chegar ao objetivo final da otimização, a segunda etapa acontecerá por um método

semelhante ao segundo método, porém o algoritmo genético só definirá os estados de geração de cada ponto de conexão, pois estes pontos já foram definidos na etapa anterior. Desta maneira, deve-se frisar que, nesta etapa, cada PC não pode gerar mais do que o limite pré-definido, assim como em todos os outro métodos realizados; e a somatória dos estados de geração em todos os pontos de conexão deve ser igual ao estado 1000, assim como o segundo método.

Por fim, na Figura 26 apresenta-se um exemplo de solução da segunda etapa do terceiro e último método.

Figura 26 - Exemplo de Solução Apresentada pela Segunda Etapa do Terceiro Método



FONTE: Produção do próprio autor.

Na próxima seção serão apresentados e discutidos todos os resultados de todos os quatro métodos e, por fim, estes resultados serão comparados entre si.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentadas as soluções encontradas pelos quatro métodos utilizados para a alocação otimizada de geração distribuída no alimentador de 34 barras. Os resultados individuais de cada método serão posteriormente comparados e discutidos entre si.

As discussões serão guiadas em três etapas: a primeira consiste na análise do alimentador sem a presença de GD, que servirá de base para as outras análises do estudo; em seguida serão discutidos os resultados individuais de cada método em relação aos encontrados na etapa anterior; e, por fim, haverá a comparação destes resultados de forma a identificar quais métodos possuem melhores resultados.

6.1 ALIMENTADOR SEM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Após definir o alimentador e o seus dados operacionais e técnicos, o primeiro passo da metodologia é realizar o fluxo de potência para se calcular as perdas deste sistema sem a presença de geração distribuída.

Desta forma, na Tabela 5 e no Gráfico 6 são apresentados, respectivamente, as perdas e o perfil de tensão do alimentador antes de qualquer interferência de geração distribuída.

Tabela 5 – Perdas no Alimentador sem Geração Distribuída

Perdas sem Geração (kW)
73,8915

FONTE: Produção do próprio autor.

Gráfico 6 - Nível de Tensão nas Barras do Alimentador sem Geração Distribuída

FONTE: Produção do próprio autor.

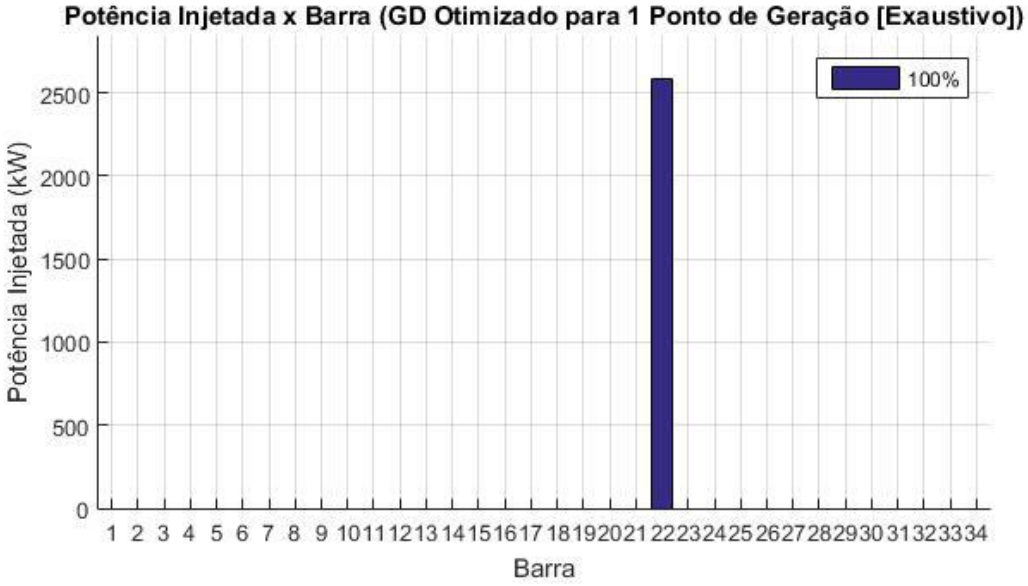
As perdas representam 1,59% de toda demanda ativa do alimentador e, analisando o perfil de tensão junto com a informação de demanda por barra mostrada no Gráfico 4, podemos inferir que o ramo entre as barras 17 e 27 e o ramo entre as barras 7 e 12 são os pontos com maior concentração de carga no alimentador, o que explica a queda mais acentuada no perfil de tensão nesses ramos.

Assim, é de se esperar que as soluções tenderão a alocar as unidades de GD em barras presentes em um desses ramos no intuito de diminuir o carregamento e, por consequência, as altas perdas nessas regiões. Também, é de se esperar uma grande melhora nos níveis de tensão destes ramos caso os pontos de geração sejam alocados sobre eles.

6.2 MÉTODO EXAUSTIVO

O método exaustivo realizou uma busca completa de todas as possíveis configurações para um único ponto de geração entregando 100% da geração limite pré-determinada (50% da demanda ativa das cargas do alimentador). O resultado é apresentado no Gráfico 7.

Gráfico 7 – Solução Método Exaustivo com 1 Ponto de Geração

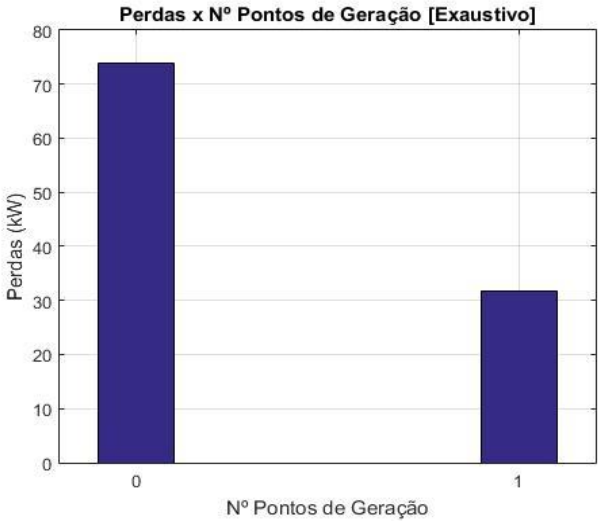


FONTE: Produção do próprio autor.

Como era de se esperar, a alocação foi realizada na barra 22 pertencente ao ramo mais carregado do alimentador. Dado que o método exaustivo testa todas as possíveis soluções para características pré-definidas, pode-se afirmar que este resultado de perdas é o mínimo absoluto para um sistema com um único ponto de geração e operando no limite de geração.

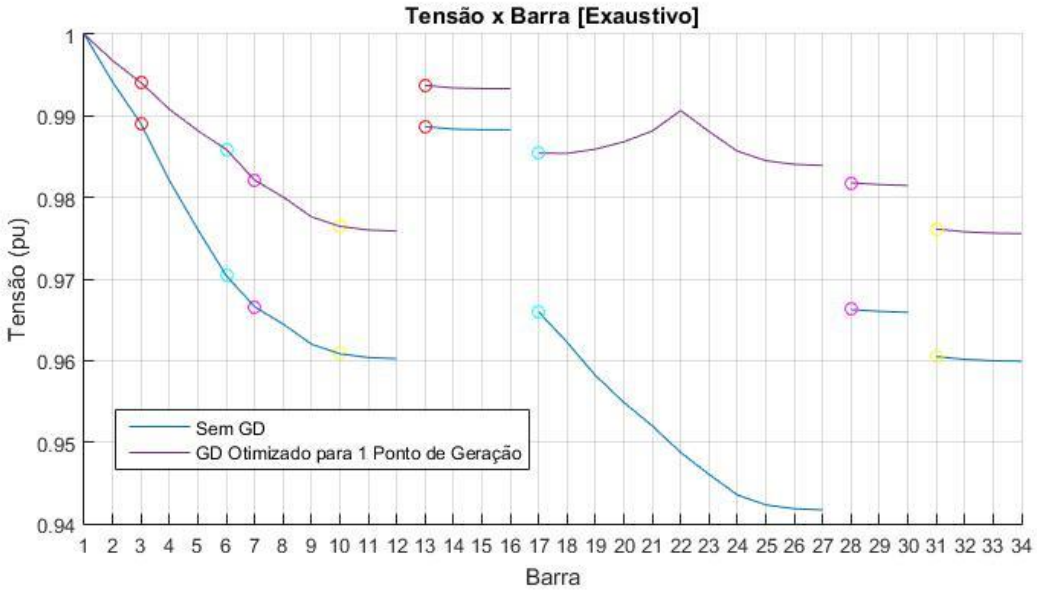
No Gráfico 8 e Gráfico 9 é possível observar as perdas e os níveis de tensão do alimentador para a solução apresentada, comparado com os do sistema sem a presença de GD.

Gráfico 8 – Perdas por Nº de Pontos de Geração do Método Exaustivo



FONTE: Produção do próprio autor.

Gráfico 9 – Nível de Tensão nas Barras para as Soluções do Método Exaustivo



FONTE: Produção do próprio autor.

É notável que, somente com um único ponto de geração no alimentador, houve uma redução nas perdas em mais de 50% e os níveis de tensão sofreram um grande aumento se comparado com o caso padrão. A queda de tensão nos ramos mais carregados reduziu bastante a sua inclinação, permitindo que o perfil de tensão do alimentador não atingisse níveis inferiores a 0,975 pu em comparação aos 0,94 pu do caso padrão. Por fim, é importante observar a existência de um pico de tensão sobre a barra de alocação da unidade de GD, o qual é consequência da alta quantidade de potência injetada em um único ponto, o que resulta em altas correntes reversas nas proximidades do ponto de conexão no alimentador.

6.3 MÉTODO DE ALGORITMO GENÉTICO COM RESTRIÇÃO DE PONTO DE GERAÇÃO

Este primeiro método que faz uso da técnica conhecida como algoritmo genético foi utilizado para encontrar soluções onde se limita o número de pontos de geração, mas dá total liberdade para a geração total do sistema de GD tomar qualquer valor, desde que esteja dentre os estados possíveis definidos na Tabela 4.

Foram realizadas otimizações para até 10 pontos de geração, contudo serão apresentadas as soluções para até 5 pontos, pois, como será observado no Gráfico 15, números maiores de pontos de geração não contribuem significativamente para a redução das perdas no alimentador.

Portanto, nos gráficos: Gráfico 10, Gráfico 11, Gráfico 12, Gráfico 13 e Gráfico 14 é possível observar as soluções retornadas pelo algoritmo para 1, 2, 3, 4 e 5 pontos de geração, respectivamente.

Gráfico 10 - Solução Primeiro Método de Algoritmo Genético com 1 Ponto de Geração

FONTE: Produção do próprio autor.

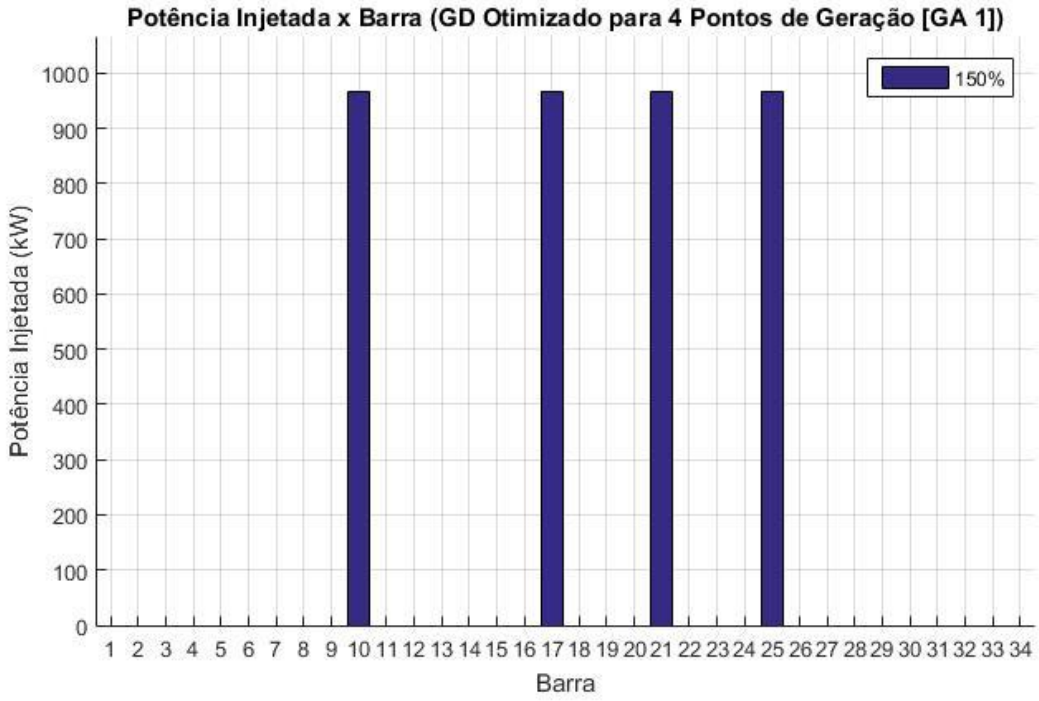
Gráfico 11 - Solução Primeiro Método de Algoritmo Genético com 2 Pontos de Geração

FONTE: Produção do próprio autor.

Gráfico 12 - Solução Primeiro Método de Algoritmo Genético com 3 Pontos de Geração

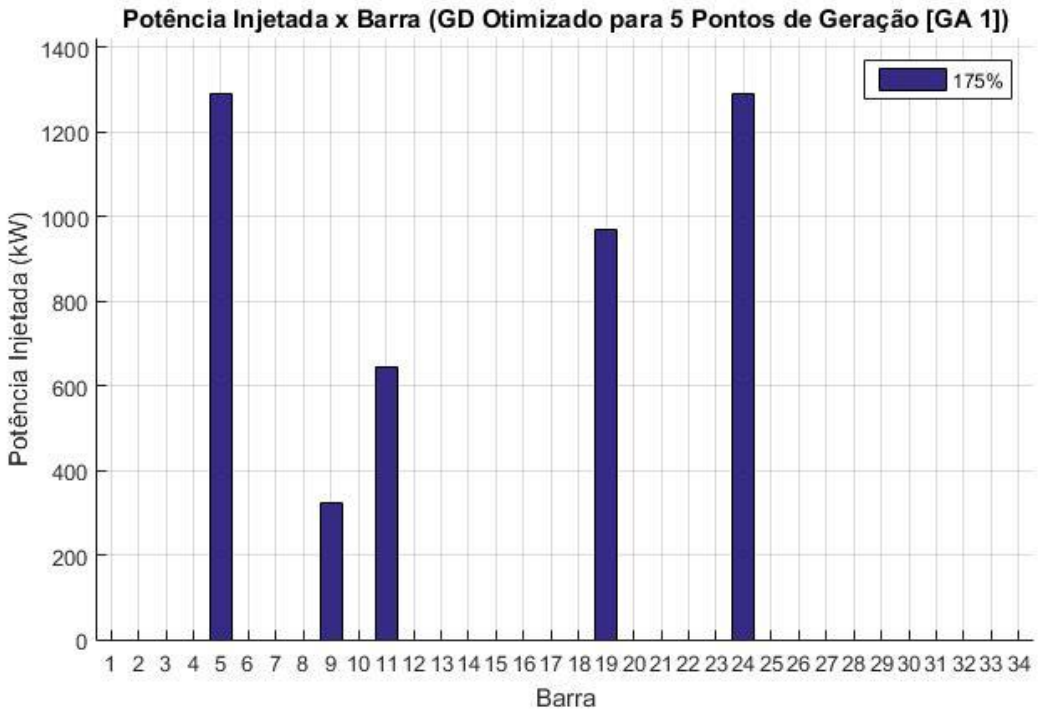
FONTE: Produção do próprio autor.

Gráfico 13 - Solução Primeiro Método de Algoritmo Genético com 4 Pontos de Geração



FONTE: Produção do próprio autor.

Gráfico 14 - Solução Primeiro Método de Algoritmo Genético com 5 Pontos de Geração



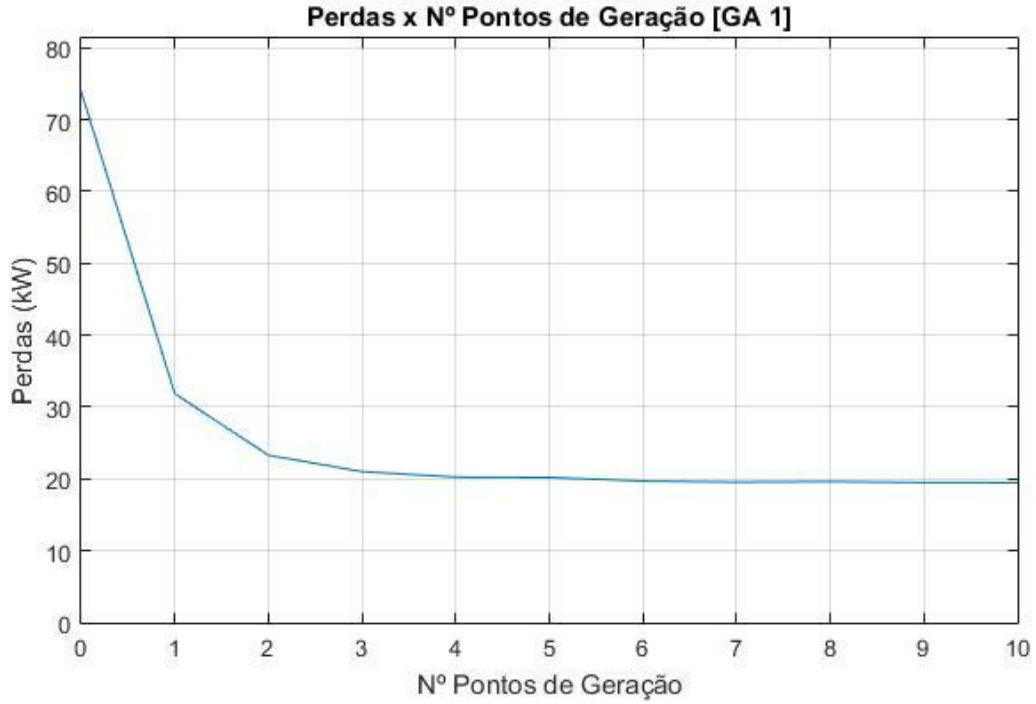
FONTE: Produção do próprio autor.

Novamente, os pontos escolhidos para injeção de potência gerada pelas unidades de GD estão concentrados nos ramos de maior carregamento. Vale ressaltar que a produção total do sistema de GD aumenta em relação ao limite de geração

estipulado com o aumento do número de pontos de geração, sendo a produção total do sistema com um único ponto de conexão e com cinco pontos, respectivamente, 100% e 175% do limite de geração. Uma última observação é que a solução para uma rede com um ponto de geração é exatamente a mesma apresentada pelo método exaustivo, o que não era, necessariamente, esperado, dado que o algoritmo possui a liberdade de determinar a injeção total de potência no alimentador.

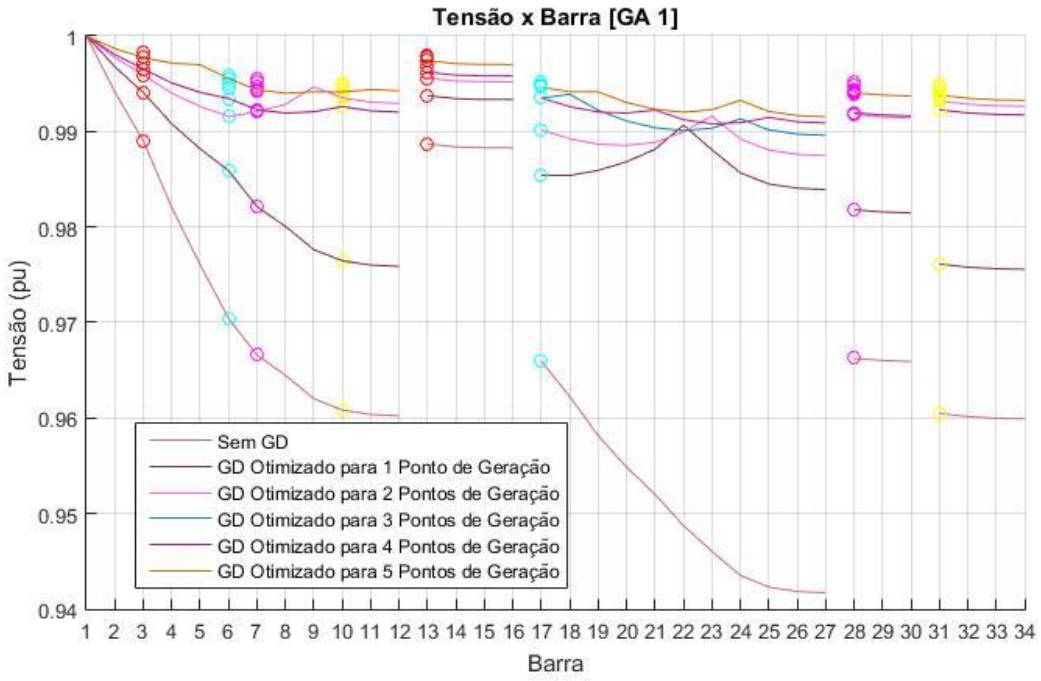
No Gráfico 15 e Gráfico 16 estão explicitados as perdas no alimentador em relação ao número de pontos de geração e o perfil de tensão para as cinco soluções apresentadas e a configuração padrão do alimentador.

Gráfico 15 - Perdas por Nº de Pontos de Geração do Primeiro Método de Algoritmo Genético



FONTE: Produção do próprio autor.

Gráfico 16 - Nível de Tensão nas Barras para as Soluções do Primeiro Método de Algoritmo Genético



FONTE: Produção do próprio autor.

Percebe-se uma grande melhora no perfil de tensão quando se aumenta o número de pontos de geração. Ela não só toma níveis maiores, chegando a ficar, permanentemente, acima de 0,99 pu, como também os picos de tensão se tornam mais suaves, dada a maior distribuição dos pontos onde ocorrem injeção de potência.

Em relação às perdas, percebe-se que, mesmo com o aumento da quantidade de pontos de geração, elas se estabilizam em pouco menos de 20 kW. Isso indica a existência de uma quantidade intrínseca de perdas mínimas no alimentador para um sistema com certas restrições empregadas, ou seja, tentar procurar soluções para um número maior de pontos de geração é não só desnecessário como mais custoso na hipótese de uma possível implementação.

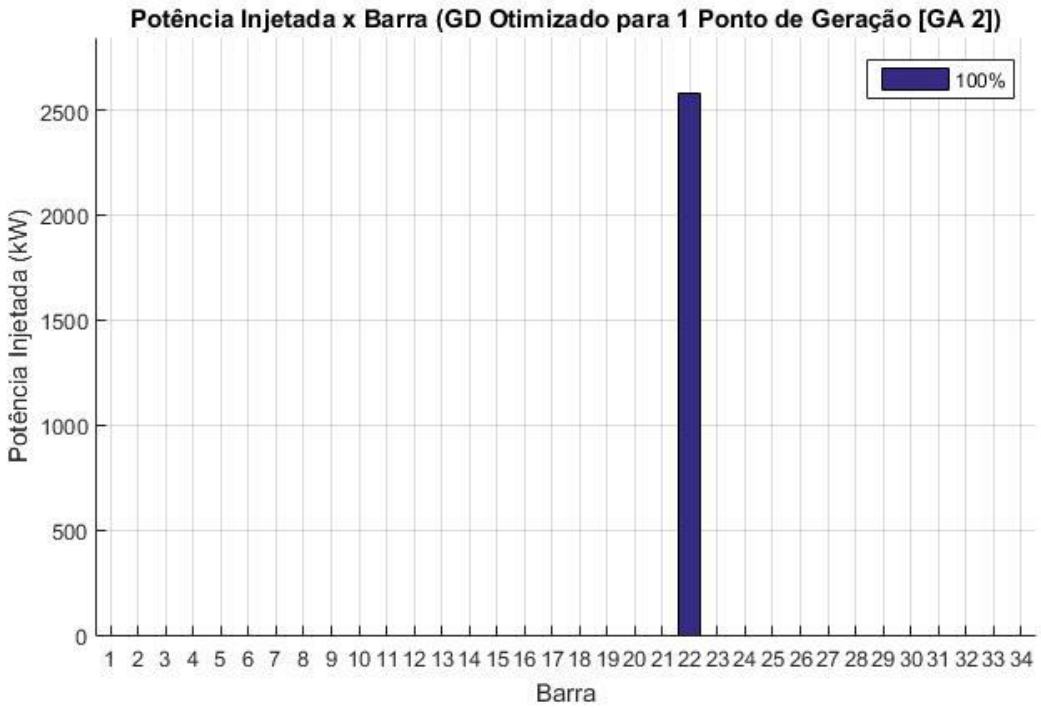
6.4 MÉTODO DE ALGORITMO GENÉTICO COM RESTRIÇÃO DE PONTO E QUANTIDADE DE GERAÇÃO

Este segundo método baseado em algoritmo genético possui o mesmo princípio que o método anterior, porém, com a restrição de que a geração total do sistema de GD será sempre igual ao limite pré-estabelecido.

De maneira análoga ao método anterior, foram realizadas otimizações para até dez pontos de geração, porém, da mesma forma, serão apresentados até cinco pontos de geração, pois valores maiores não contribuem significativamente para atingir o objetivo da otimização.

Nos gráficos: Gráfico 17, Gráfico 18, Gráfico 19, Gráfico 20 e Gráfico 21 são apresentadas as soluções retornadas pelo algoritmo para, respectivamente, 1, 2, 3, 4 e 5 pontos de geração, com o valor total de potência fornecida fixada em 50% da demanda ativa.

Gráfico 17 - Solução Segundo Método de Algoritmo Genético com 1 Ponto de Geração

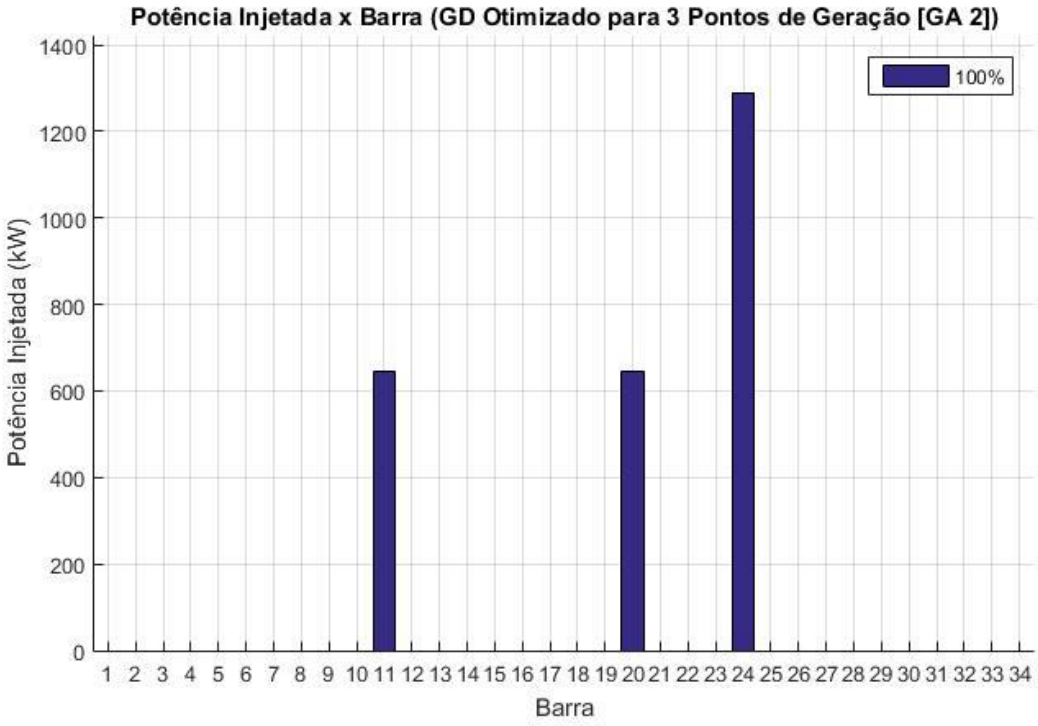


FONTE: Produção do próprio autor.

Gráfico 18 - Solução Segundo Método de Algoritmo Genético com 2 Pontos de Geração

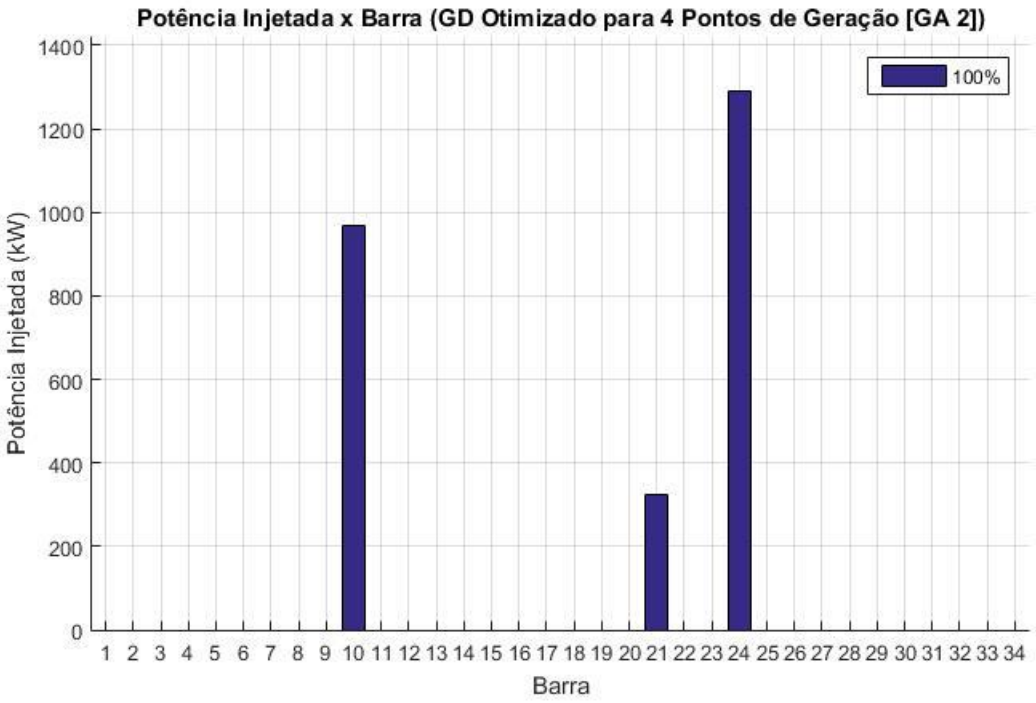
FONTE: Produção do próprio autor.

Gráfico 19 - Solução Segundo Método de Algoritmo Genético com 3 Pontos de Geração



FONTE: Produção do próprio autor.

Gráfico 20 - Solução Segundo Método de Algoritmo Genético com 4 Pontos de Geração



FONTE: Produção do próprio autor.

Gráfico 21 - Solução Segundo Método de Algoritmo Genético com 5 Pontos de Geração

FONTE: Produção do próprio autor.

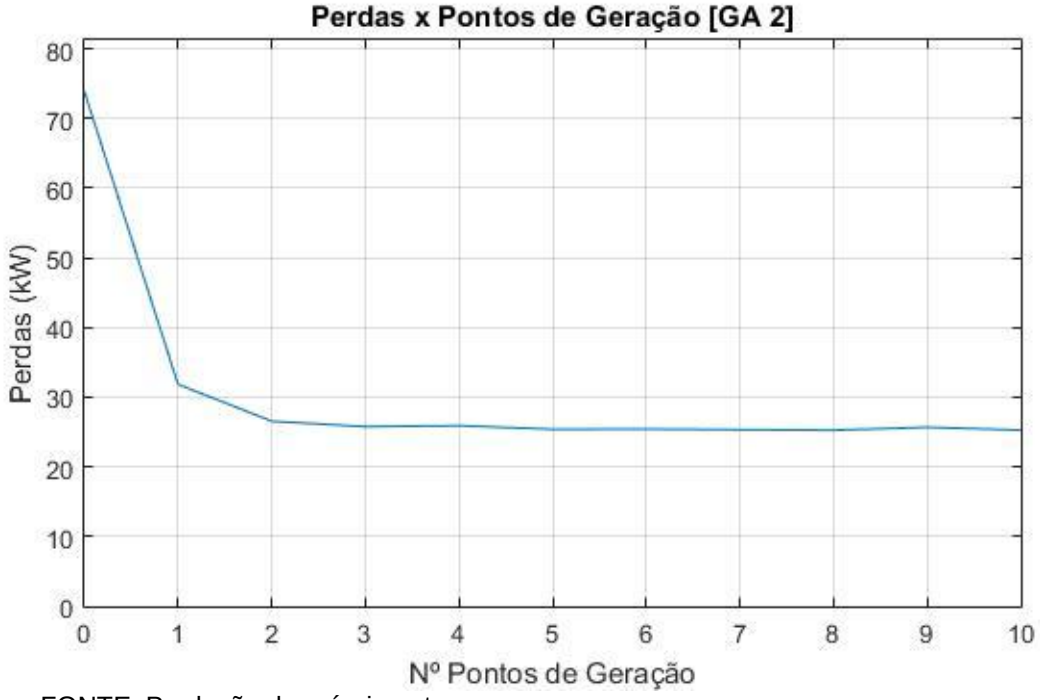
Similarmente, nas soluções retornadas, as barras com alocação de GD pertencem aos dois ramos com maior concentração de carga no sistema. Como o valor total de geração é fixo, alguns pontos de geração podem ser definidos com estado ‘0000’,

que indica nenhuma injeção de potência, como é o caso da solução para quatro pontos de geração, onde a barra 22 está definida com este estado de geração.

A solução encontrada para o sistema com um ponto de geração foi exatamente a mesma do método exaustivo e do método anterior. Neste caso, esta igualdade entre o resultado deste método com o do exaustivo era esperado, dado que ambos possuíam a mesma restrição de número de pontos de geração e total de potência gerada. Assim, é possível afirmar que, pelo menos para a solução com um ponto de geração, este método retornou o valor de perdas mínimo absoluto.

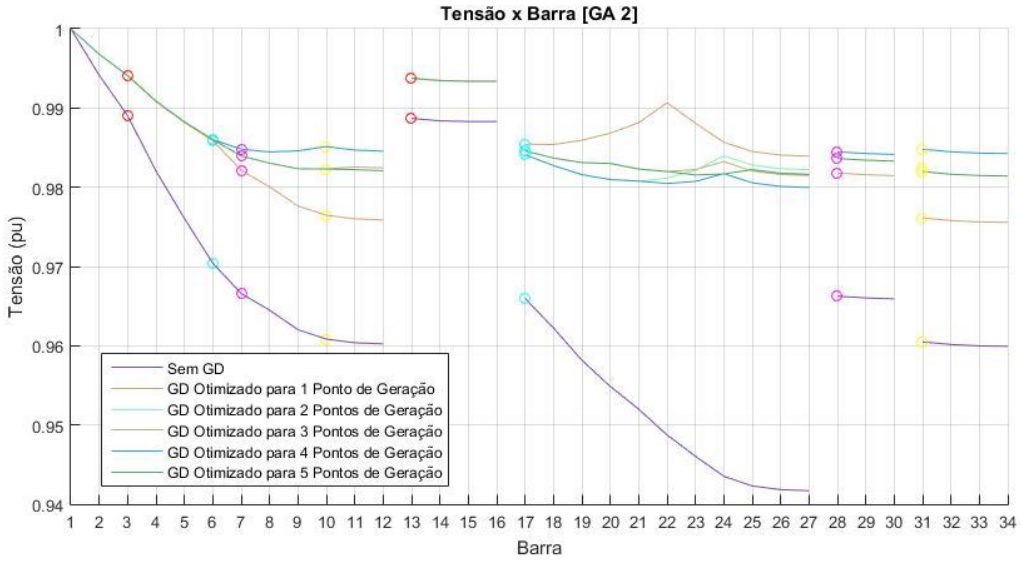
Nos próximos dois gráficos, é possível observar as perdas no alimentador em relação ao número de pontos de geração e o perfil de tensão para as cinco soluções apresentadas e para a configuração padrão do alimentador.

Gráfico 22 - Perdas por Nº de Pontos de Geração do Segundo Método de Algoritmo Genético



FONTE: Produção do próprio autor.

Gráfico 23 - Nível de Tensão nas Barras para as Soluções do Segundo Método de Algoritmo Genético



FONTE: Produção do próprio autor.

No Gráfico 22 é possível destacar que as perdas tendem a um mínimo técnico em torno de 25 kW e que o aumento do número de pontos de geração, a partir de certo ponto, não traz impactos significativos na redução das perdas de potência ativa.

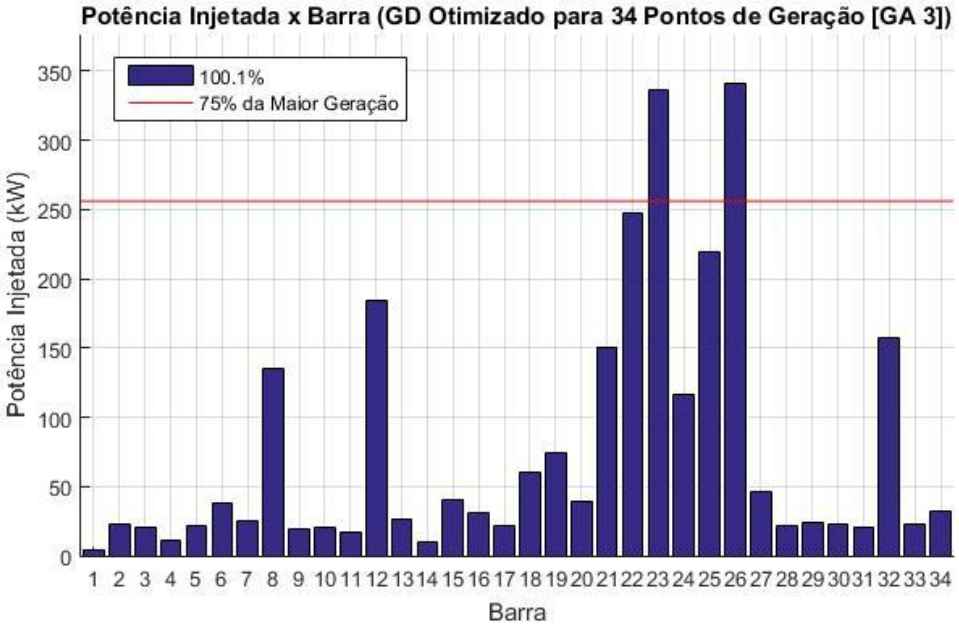
Por fim, no Gráfico 23 é mostrada, assim como no método anterior, uma grande redução na queda de tensão ao longo do alimentador, ficando totalmente acima de 0,98 pu a partir da solução com dois pontos de geraçã;, e uma menor acentuação dos picos de tensão nos pontos de geração quando estes estão distribuídos em maior número.

6.5 MÉTODO DE ALGORITMO GENÉTICO MISTO

O último método com base no algoritmo genético é denominado método misto, pois consiste em duas aplicações em série do algoritmo genético. Na primeira etapa o algoritmo é aplicado somente com a restrição da geração total que deve ser igual ao limite especificado, dessa forma, o método tem total liberdade para definir a quantidade de pontos de geração, desde que a somatória da potência injetada de todos eles seja igual a um valor pré-definido.

No Gráfico 24 está explicitada a solução retornada por esta etapa, que realizou alocações em todas as barras do alimentador.

Gráfico 24 - Solução Terceiro Método de Algoritmo Genético com Liberdade de Pontos de Geração



FONTE: Produção do próprio autor.

Alocar geração em todas as barras do alimentador com o intuito de diminuir as perdas é inviável e extremamente custoso. Contudo, esta solução possui um resultado com um perfil gaussiânico que nos permite identificar barras que possuem maior relevância para se chegar ao objetivo da otimização.

Neste estudo foram consideradas relevantes as barras com geração igual ou superior a 75% do maior valor de injeção de potência presente em uma única barra, ou seja, as barras 23 e 26.

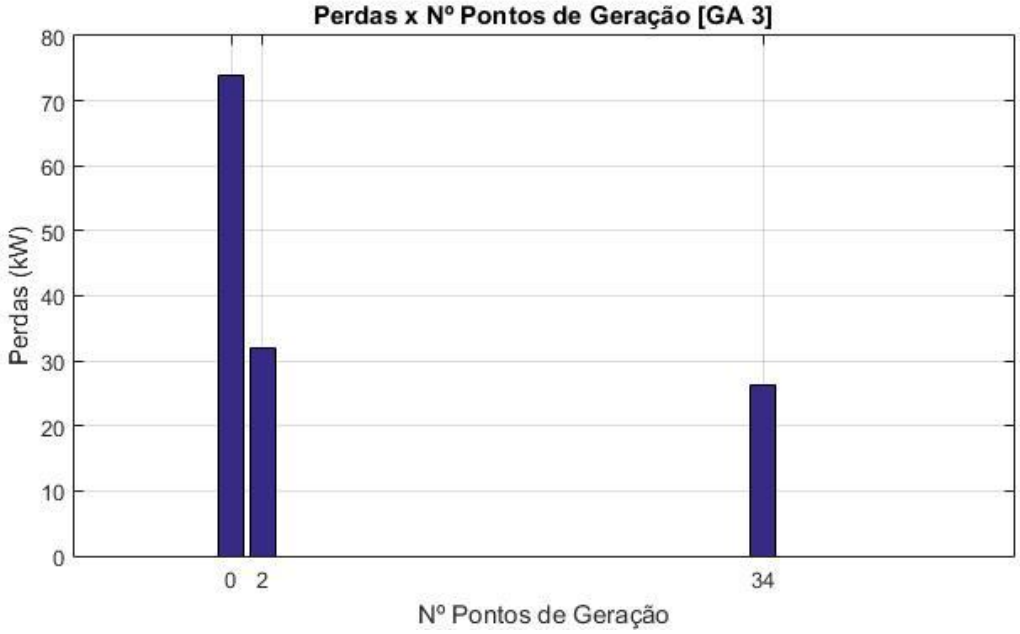
A partir da definição das barras mais relevantes, a segunda etapa de aplicação do algoritmo genético se assemelha muito ao segundo método mencionado na seção anterior, porém com os pontos de geração pré-definidos. Ela consiste em definir os estados de geração dos pontos de conexão relevantes. As restrições desta etapa são quais e quantos pontos de geração, que foram definidos na etapa anterior, e a quantidade total de geração, que é igual ao limite da etapa anterior. No Gráfico 25 está a solução retornada pela segunda etapa.

No Gráfico 26 são mostrados os valores de perdas para o alimentador padrão e para as soluções da primeira e segunda etapa, enquanto que no Gráfico 27 é explicitado o perfil de tensão para esses mesmos três casos.

Gráfico 25 - Solução Terceiro Método de Algoritmo Genético com Pontos de Geração Relevantes

FONTE: Produção do próprio autor.

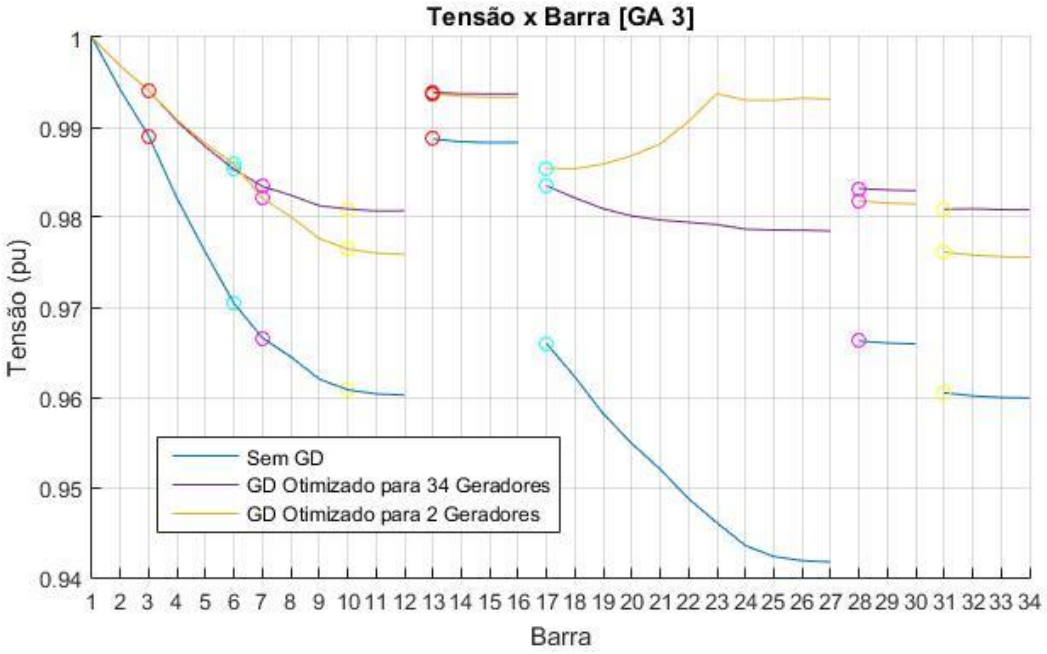
Gráfico 26 - Perdas por Nº de Pontos de Geração do Terceiro Método de Algoritmo Genético



FONTE: Produção do próprio autor.

Na primeira etapa, as perdas contabilizam cerca de 26 kW, já ao final do método, que é referente à segunda etapa, as perdas sofreram um aumento de 6 kW, o que corresponde a um aumento de 23%, contabilizando cerca de 32 kW de perdas, ou seja, 43% das perdas do sistema padrão.

Gráfico 27 - Nível de Tensão nas Barras para as Soluções do Terceiro Método de Algoritmo Genético



FONTE: Produção do próprio autor.

Em relação ao perfil de tensão, o resultado final mostrou uma menor queda de tensão em relação ao alimentador padrão. Também é interessante enfatizar que, para o resultado intermediário com a distribuição de geração em todas as barras do alimentador, os picos de tensão são quase imperceptíveis, possuindo uma queda de tensão mais suave e com maiores valores em comparação ao perfil padrão.

6.6 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os resultados de todos os métodos em conjunto, para que os mesmos possam ser comparados e avaliados. Para tanto, nas tabelas a seguir, estão apresentados os valores de perdas, em kW, do alimentador no estado padrão e das soluções de cada método.

Na Tabela 6 é apresentado, em kW, as perdas no alimentador para a solução encontrada pelo método exaustivo e para a configuração padrão do alimentador; na Tabela 7 são mostradas as perdas das soluções (intermediária e final) do método misto e para o sistema sem GD; e na Tabela 8 é explicitado os resultados dos dois primeiros métodos baseados em algoritmo genético.

Tabela 6 – Perdas no Alimentador Padrão e da Solução do Método Exaustivo

Perdas sem Geração (kW)	Perdas Método Exaustivo (kW)	Perdas/Perdas sem GD (%)
73,8915	31,8535	43,11%

FONTE: Produção do próprio autor.

Tabela 7 - Perdas no Alimentador Padrão e da Solução Intermediária e Final do Método Misto

Perdas sem Geração Distribuída (kW)	Perdas Terceiro Método (kW) Sem Limite		Perdas Terceiro Método (kW) Barras Relevantes	
	Perdas (kW)	Perdas/Perdas sem GD (%)	Perdas (kW)	Perdas/Perdas sem GD (%)
73,8915	26,3418	35,65%	31,8909	43,16%

FONTE: Produção do próprio autor.

Tabela 8 - Perdas no Alimentador Padrão e das Soluções do Primeiro e Segundo Método de Algoritmo Genético

Nº de Pontos de Geração	Método 1			Método 2			Diferença (kW)
	Perdas (kW)	Geração/Limite (%)	Perdas/Perdas sem GD (%)	Perdas (kW)	Geração/Limite (%)	Perdas/Perdas sem GD (%)	
1	31,8535	100,00%	43.11%	31,8535	100,00%	43.11%	0,0000
2	23,2868	137,50%	31.51%	26,5644	100,00%	35.95%	3,2777
3	21,0076	150,00%	28.43%	25,7805	100,00%	34.89%	4,7729
4	20,2479	150,00%	27.40%	25,9232	100,00%	35.08%	5,6753
5	20,1956	175,00%	27.33%	25,9232	100,00%	35.08%	5,7276
6	19,6948	162,50%	26.65%	25,4321	100,00%	34.42%	5,7374
7	19,5451	162,50%	26.45%	25,4321	100,00%	34.42%	5,8870
8	19,6181	162,50%	26.55%	25,3421	100,00%	34.30%	5,7240
9	19,4857	175,00%	26.37%	25,6866	100,00%	34.76%	6,2009
10	19,4609	175,00%	26.34%	25,2891	100,00%	34.22%	5,8282

FONTE: Produção do próprio autor.

Observando as tabelas acima, podem-se tomar as seguintes constatações:

a) O método 1 de algoritmo genético obteve a maior redução das perdas entre todos os métodos, chegando a diminuir 73,66% das perdas do sistema original. Contudo,

este método sacrificou o controle da quantidade total de energia injetada na rede, atingindo valores de geração que ultrapassavam o limite em até 75%;

b) O método 2 de algoritmo genético entregou o segundo melhor resultado, atingindo uma redução de 64,78% nas perdas. Neste método, as perdas eram, em média, 4,88 kW (22,76%) maiores do que as do método 1, contudo, este método possui o controle da geração total do sistema de GD;

c) O método misto retornou o pior resultado entre todos os métodos, com uma redução de 56,84% nas perdas. Inclusive, sua solução intermediária, com alocação em todas as barras, obteve uma redução de 64,35%, menor do que os outros métodos de algoritmo genéticos, o que comprova que a alocação em todas as barras não é só inviável financeiramente, mas também não traz uma boa redução nas perdas;

d) É possível indagar que o método misto possa vir a trazer melhores resultados caso a porcentagem de corte que define a relevância das barras seja alterada, visando abranger um maior número de barras que demonstraram possuir certa relevância;

e) O método exaustivo retornou o mesmo resultado encontrado para um sistema com um único ponto de geração nos métodos 1 e 2 de algoritmo genético. Diferentemente dos métodos baseados em algoritmo genético que possuem como resultado soluções na vizinhança do mínimo absoluto, com a possibilidade de se localizar neste mínimo; o método exaustivo, embora utilize muitas restrições, sempre retornará o mínimo absoluto. Dessa forma ele pôde ser utilizado como validador dos resultados apresentados pelos métodos de algoritmo genético;

f) Dado que o método exaustivo necessita de muitas restrições, como a quantidade de pontos de geração e seus respectivos estados de geração, é questionada a possibilidade de substituição do método exaustivo por métodos que, embora não necessariamente retornem o mínimo absoluto, possuam um campo de busca maior e com menos restrições, como é o caso dos métodos de algoritmo genético;

7 CONCLUSÃO

O presente estudo apresentou diversos métodos baseados em algoritmo genético para alocação otimizada de geradores distribuídos em um alimentador radial com o objetivo de reduzir as perdas de potência ativa totais do alimentador e, por consequência, amenizar a queda de tensão na rede, melhorando seu perfil de tensão.

Foi apresentada uma variedade de métodos com diferentes aproximações para solucionar um problema em comum. Todos obtiveram sucesso em sua aplicação para redução das perdas, com destaque para os métodos 1 e 2 de algoritmo genético sem a restrição de geração total e com a restrição, que demonstraram ser mais eficientes com os melhores resultados em termos de redução das perdas e perfil de tensão.

Cabe adicionar que o método apresentado, denominado busca exaustiva, não é um método aconselhável devido ao enorme processamento exigido, caso não sejam aplicadas uma grande quantidade de restrições. Contudo, ele pôde ser utilizado como validador de alguns resultados encontrados pelos outros métodos baseados em algoritmo genético, dado que sua solução sempre indica o mínimo absoluto.

Desta maneira, os métodos apresentados possuem grande utilidade no suporte ao planejamento da operação de sistemas de distribuição que empregam geração distribuída, conceito este bastante popular e com crescimento exponencial de aplicações, pois ele auxilia em uma alocação eficiente, tanto em geração, quanto em localização, buscando os centros de carga para otimizar o uso e a qualidade da energia em todo o sistema.

Entretanto, não quer dizer que o estudo não possa ser aperfeiçoado futuramente. Portanto, podemos propor o desenvolvimento dos seguintes trabalhos:

a) Minimização das perdas considerando a sazonalidade da demanda em cada barra no alimentador, especificamente, e da geração dos sistemas de GD;

b) Otimização Multiobjetivo, ou seja, a análise de outros fatores, em paralelo, além das perdas, como o custo operacional, o nível de tensão e corrente de curto;

c) Aplicação do algoritmo em alimentadores mais complexos, como os que possuem conexão em anel e com faseamento desequilibrado;

d) Aplicação de outros métodos heurísticos e clássicos;

e) Análise mais detalhada, considerando as perdas operacionais de geração das unidades de GD e a operação de outros ativos da rede, como reguladores e disjuntores de proteção.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Rosana Guimarães. **Alocação e Dimensionamento da Geração Distribuída no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica**. 2016. Monografia – Curso de Graduação de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2016.

AL-SABOUNCHI, Ammar M. Munir. **Optimal Sizing and Location of Photovoltaic Generators on Three Phase Radial Distribution Feeder**. 2011. Tese – Faculty of Technology, De Montfort University, Leicester (UK), 2011. Disponível em: <https://www.dora.dmu.ac.uk/bitstream/handle/2086/5225/PhD_Thesis_Ammar%20AL-Sabounchi.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 26 nov. 2018.

ANEEL (Brasil). **Geração Distribuída**. Brasília: ANEEL, 2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 04 dez. 2017.

_____. **Micro e Minigeração Distribuída**: Sistema de Compensação de Energia Elétrica. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 04 dez. 2017.

_____. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST):** Módulo 1 - Introdução. Brasília: ANEEL, 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 04 dez. 2017.

_____. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST):** Módulo 2 – Planejamento da Expansão da Distribuição. Brasília: ANEEL, 2016. Disponível em: < http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/modulo2.pdf >. Acesso em: 04 dez. 2018.

_____. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST):** Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição. Brasília: ANEEL, 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 04 dez. 2018..

_____. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 19 abr. 2012. Seção 1, p. 53.

_____. Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 02 dez. 2015. Seção 1, p. 45.

CASTRO, L.; VON ZUBEN, F. **Programação Evolutiva**. [s.d.]. Disponível em: <ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/ia707_02/topico11_02.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2018.

CHIS, M.; SALAMA, M.; JAYARAM, S. Capacitor placement in distribution systems using heuristic search strategies. **IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.**, v. 144, n. 3, 1997. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/588352>. Acesso em: 20 nov. 2018.

FREITAS, Walmir. **Comportamento de redes de distribuição na presença da microgeração**. [s.d.] Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/16832783/2+-+COMPORTAMENTO+DA+REDE+GD.pdf/2c4862b1-5dfc-40d5-7f30-3fb4129461b9>. Acesso em: 25 nov. 2018.

GABRIEL, P.; DELBEM, A. **Fundamentos de Algoritmos Evolutivos**. [s.d.]. Disponível em: <http://conteudo.icmc.usp.br/CMS/Arquivos/arquivos_enviados/BIBLIOTECA_113_ND_75.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2018.

LEÃO, Ruth. **GTD – Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Ceará, 2009. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/130060/mod_resource/content/1/Subestacoes-texto.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2018.

MÉTODOS iterativos para sistemas lineares. Disponível em: <https://www.math.tecnico.ulisboa.pt/~calves/courses/sis-it/capii22.html>. Acesso em: 10 nov. 2018.

PEREIRA, E. et al. **Atlas brasileiro de energia solar.** 1. ed. São José dos Campos: INPE, 2006. Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2018.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (Org.). **Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL, 2014. Disponível em: <https://www.portal-energia.com>. Acesso em: 05 dez. 2017.

RITCHIE, H.; ROSER, M. **Energy Production & Changing Energy Source**. 2018. Disponível em: <https://ourworldindata.org/energy-production-and-changing-energy-sources >. Acesso em: 03 dez. 2018.

RUEDA-MEDINA, A. et al. **A mixed-integer linear programming approach for optimal type, size and allocation of distributed generation in radial distribution systems**. São Paulo: Elsevier, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779612003616>. Acesso em: 29 nov. 2018.

RUEDA-MEDINA, Augusto César. **Fluxo de Potência**. Disponível em: <http://acsee.ufes.br/conteudo_ASEP/Unidade_3_Fluxo_Potencia/>. Acesso em: 20 nov. 2018.

SANCHO CAPARRINI, Fernando. **Algoritmos Genéticos**. 2018. Disponível em: <http://www.cs.us.es>. Acesso em: 04 dez. 2018.

SIMÕES, Felipe. **Entenda o que influencia a geração do seu sistema solar**. 10 ago. 2015. Disponível em: <http://www.enovaenergia.com.br/blog/post/entenda-o-que-influencia-a-geracao-do-seu-sistema-solar>. Acesso em: 20 nov. 2018.

SOLARGIS. **Solar resource maps of Brazil**. 2017. Disponível em: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/brazil>. Acesso em: 13 nov. 2018.

SOUZA, Marcone Jamilson Freitas. **Inteligência Computacional para Otimização**. 2011. Disponível em: <http://www.decom.ufop.br/marcone/Disciplinas/InteligenciaComputacional/InteligenciaComputacional.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2018.

SKORUPA, T.; MARTINS, M.; PAZ, M. Alocação ótima de geração distribuída fotovoltaica para redução de perdas de energia em sistemas de distribuição de energia elétrica: um estudo de caso. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Gramado, 2018. Disponível em: <http://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/viewFile/173/173>. Acesso em: 02 dez. 2018.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). Instituto de Energia Ambiente (IEE). **O Sistema Elétrico**. São Paulo: USP, [20--]. Disponível em: <https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840834/59/SistemaEletrico1.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2018.