



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE BOM JESUS DA LAPA
COLEGIADO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
SILAS FREITAS MENEZES

**ANÁLISE DA ALOCAÇÃO E DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE GERAÇÃO
DISTRIBUIDA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL UTILIZANDO
ALGORITMO COLÔNIA ARTIFICIAL DE ABELHAS**

Bom Jesus da Lapa-BA

Dezembro/2019

SILAS FREITAS MENEZES

**ANÁLISE DA ALOCAÇÃO E DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE GERAÇÃO
DISTRIBUIDA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL UTILIZANDO
ALGORITMO COLÔNIA ARTIFICIAL DE ABELHAS**

Projeto de trabalho de conclusão de curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Ma. Andressa Pereira Oliveira

Bom Jesus da Lapa-BA

Dezembro/2019

FICHA CATALOGRÁFICA

M543

Menezes, Silas Freitas

Análise da alocação e dimensionamento ótimo de geração distribuída no sistema de distribuição radial utilizando algoritmo colônia artificial de abelhas. / Silas Freitas Menezes. - 2019.

78f.: il.

Orientadora: Prof^a. Ma. Andressa Pereira Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso – (Graduação em Engenharia Elétrica)
- Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa, BA, 2019.

1. Engenharia Elétrica I. Oliveira, Andressa Pereira II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa. III. Título.

CDD 621.3

Biblioteca Universitária de Barreiras – UFOB

SILAS FREITAS MENEZES

**ANÁLISE DA ALOCAÇÃO E DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE GERAÇÃO
DISTRIBUIDA NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL UTILIZANDO
ALGORITMO COLÔNIA ARTIFICIAL DE ABELHAS**

Área de concentração: Sistemas de Potência

Data da Defesa: 12 de Dezembro de 2019

Banca Examinadora:

Andressa Pereira Oliveira

Prof. Ma. _____

Kleymilson do Nascimento Souza

Prof. Dr. _____

Erick Baleeiro da Silva

Prof. Me. _____

Bom Jesus da Lapa-BA

Dezembro/2019

Dedicatória

*A minha mãe,
Pelo amor, exemplo, dedicação, incentivo e carinho.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por ser o maestro da minha vida, minha força, motivação e por proporcionar momentos de lutas e conquistas, como este trabalho, em toda minha vida. Obrigado por tudo que eu sou, pois sem ti nada disso seria possível.

Agradeço a minha mãe, por ser minha incentivadora, pastora, conselheira, amiga e por me direcionar em todos os momentos da minha vida para poder chegar a momentos como esse. Obrigado por me amar, cuidar e ser minha professora da vida.

Agradeço a minha orientadora, Andressa Oliveira, por todo apoio, disposição, paciência, conselho, amizade e por compartilhar seu conhecimento. Obrigado pelas orientações e parabéns por ser uma engenheira e professora de excelência.

Agradeço aos professores Erick Baleeiro e Kleymilson Souza, por terem aceitado avaliar e colaborar para este trabalho.

Agradeço aos meus professores de graduação, pelo conhecimento e experiência partilhado. Obrigado por contribuírem para o que eu sou hoje e deixarem comigo um pouco de cada um de vocês.

Agradeço as minhas tias, Enia e Iza, e minha avó, Alice, por toda ajuda e por terem contribuído e apoiado para chegar até esse momento.

Agradeço a minha amiga e colega de turma, Laice Oliveira, por toda a ajuda, paciência, amizade e disposição nessa jornada acadêmica.

Agradeço aos meus amigos que fiz na COELBA de Bom Jesus da Lapa durante o período de estágio por terem feito parte da minha vida. Obrigado por contribuírem para o meu crescimento pessoal e profissional e por demonstrarem na prática a importância do trabalho em equipe.

Agradeço aos meus familiares por sempre torcer, mesmo de longe, pelo meu sucesso.

Agradeço aos meus amigos de infância, de faculdade e de trabalho por fazerem parte da minha vida da minha vida, incentivando, orientando, compartilhando momentos difíceis e por serem meu benchmark. Rhuan Lemos, Leonardo Moreira, Uharles Dias, Ramon Neves, Willian Cruz meu obrigado especial.

Agradeço a primeira turma de engenharia elétrica da UFOB da qual faço parte pelos momentos compartilhados, pelo companheirismo e solidariedade.

Agradeço a todos que fizeram parte dessa jornada e que torceram pelo meu sucesso para poder chegar até esse momento. Obrigado por tudo e todos e que Deus abençoe a vida de cada um de vocês.

“O semear é livre, mas a colheita é obrigatória.”

(Autor Desconhecido)

Resumo

Com a crescente demanda do fornecimento de eletricidade, tanto nos países desenvolvidos quanto nos países em desenvolvimento, a necessidade de alcançar um nível aceitável de confiabilidade, qualidade e segurança a um preço econômico se torna importante para os clientes e os fornecedores de energia elétrica. No contexto da qualidade, a integração da geração distribuída aos sistemas de energia elétrica representa uma forma descentralizada de geração de energia que proporciona melhorias de nível de tensão e alívio de carga no sistema de distribuição. Além disso, a análise do perfil ótimo do sistema de forma rápida e precisa se tornar um fator essencial no âmbito do fornecimento de energia. Em vista disso, o presente trabalho apresenta uma análise da alocação e dimensionamento ótimo de geração distribuída em sistemas de distribuição radial a partir do estudo do fluxo de potência do sistema, utilizando como meta-heurística o algoritmo Colônia Artificial de Abelhas. O algoritmo foi aplicado para o sistema de 33 e 69 barras do IEEE visando avaliar o desempenho dos mesmos e o desempenho do algoritmo no processo de otimização. Os resultados constaram que a inserção da geração distribuída nos sistemas contribui para a melhoria do perfil de tensão da rede e na redução das perdas do sistema. Além disso, o algoritmo Colônia Artificial de Abelhas apresentou desempenho satisfatório com relação ao dimensionamento ótimo da geração distribuída.

Palavra-chave: Dimensionamento e Alocação Ótima, Geração Distribuída, Sistema de Distribuição Radial, Algoritmo Colônia Artificial de Abelhas.

Abstract

With the increasing demand for electricity supplies in both developed and developing countries, the need to achieve an acceptable level of reliability, quality and safety at an economical price becomes important for customers and suppliers of electricity. In the context of quality, the integration of distributed generation into power systems represents a decentralized form of power generation that provides voltage level improvements and load relief in the distribution system. In addition, the analysis of the optimal system profile quickly and accurately becomes an essential factor in power supply. In view of this, the present work presents an analysis of the optimal allocation and sizing of distributed generation in radial distribution systems from the study of the system power flow, using as metaheuristic the Artificial Bee Colony algorithm. The algorithm was applied to the IEEE 33 and 69 bar system to evaluate their performance and the algorithm performance in the optimization process. The results showed that the insertion of distributed generation in the systems contributes to the improvement of the network voltage profile and the reduction of system losses. In addition, the Artificial Bee Colony algorithm performed satisfactorily with respect to optimal distributed generation sizing.

Keyword: Optimal size and allocation, Distributed Generation, Radial Distribution System, Algorithm Artificial Bee Colony.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Objetivos	15
1.1.1. Geral.....	15
1.1.2. Específico.....	15
1.2. Justificativa	15
1.3. Estado da arte	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1. Sistema Elétrico de Potência	19
2.2. Sistema de distribuição.....	21
2.3. Fluxo de Potência Radial.....	23
2.4. Geração Distribuída.....	29
2.5. Qualidade de energia.....	30
2.6. Algoritmo Colônia Artificial de Abelhas	31
2.7. Sistemas utilizados para a aplicação do CAA.....	34
3. METODOLOGIA	36
3.1. Fluxograma do algoritmo para a alocação da Geração Distribuída.	36
3.2. Parâmetros de Controle de algoritmo CAA	39
3.3. Restrições do algoritmo CAA para alocação e dimensionamento ótimo.	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1. Localização das GD's.....	42
4.2. Inserção de GD com Fator de Potência (FP) unitário.....	42
4.3. Inserção de GD com Fator de Potência (FP) indutivo.....	45
4.4. Inserção de GD com Fator de Potência (FP) capacitivo.....	46
4.5. Análise do desempenho do algoritmo CAA.....	50
5. CONCLUSÃO	54
5.1. Considerações Finais.....	54
5.2. Trabalhos Futuros.....	55
6. REFERÊNCIAS	56
ANEXO A- Dados do Sistema IEEE 33 barras	60
ANEXO B – Dados do Sistema IEEE 69 barras.....	62
APÊNDICE A– Algoritmo de otimização utilizado	66

Lista de Figuras

Figura 1 - Sistema Elétrico de Potência	19
Figura 2-Sistema Elétrico de Potência em todas as etapas.....	20
Figura 3- Sistema Radial	21
Figura 4-Sistema anel aberto.....	22
Figura 5- Sistema Multiradial	22
Figura 4 - Estrutura do sistema de distribuição.....	23
Figura 5-Modelo de uma rede radial.	25
Figura 6-Modelo π Para Linhas e Trechos do Alimentador	27
Figura 7- Modelo de ramo para um sistema de distribuição radial	28
Figura 8-Ilustração da busca por alimento realizado pelas abelhas	32
Figura 9- Diagrama Unifilar do Sistema de 33 barras.....	34
Figura 10-Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 69 barras.....	35
Figura 11-Fluxograma do Algoritmo	37
Figura 12-Perfil de Tensão do IEEE 33 barras sem GD	41
Figura 13 - Perfil de Tensão do IEEE 69 barras sem GD	42
Figura 14-Perfil de tensão do sistema 33 barras com GD de FP unitário	44
Figura 15 - Perfil de tensão do sistema 69 barras com GD de FP unitário	45
Figura 16-Perfil de tensão do sistema de 33 barras com GD e FP indutivo.....	46
Figura 17-Perfil de tensão do sistema 69 barras com GD e FP indutivo	47
Figura 18-Perfil de tensão do sistema 33 barras com GD e FP capacitivo	48
Figura 19-Perfil de tensão do sistema 69 barras com GD e FP capacitivo	49

Lista de Tabelas

Tabela 1- Características do Sistema de 33 barras	34
Tabela 2- Características do Sistema de 69 barras	35
Tabela 3- Valores base para transformar dados em <i>pu</i>	36
Tabela 4- Perdas dos Sistemas sem GD	41
Tabela 5- Quantidade e Localização das GD's.	43
Tabela 6- Sistema 33 barras com GD e FP unitário	43
Tabela 7- Sistema 69 barras com GD e FP unitário	44
Tabela 8- Sistema 33 barras com GD e FP indutivo	45
Tabela 9- Sistema 69 barras com GD e FP indutivo	47
Tabela 10- Sistema 33 barras com GD e FP capacitivo	48
Tabela 11- Sistema 69 barras com GD e FP capacitivo	49
Tabela 12- Comparação dos resultados com outras referências para fator de potência capacitivo.	50
Tabela 13- Comparação dos resultados com outras referências para fator de potência indutivo.	51
Tabela 14- Comparação dos resultados com outras referências para fator de potência unitário.	51
Tabela 15- Redução das Perdas do sistema de 33 barras	52
Tabela 16- Redução das perdas para o sistema de 69 barras.	53
Tabela 17- Dados de resistência e reatância do sistema IEEE de 33 barras.	60
Tabela 18- Dados de Carga do Sistema IEEE de 33 barras	61
Tabela 19- Dados de resistência e reatância do sistema IEEE de 69 barras.	62
Tabela 20- Dados de Carga do Sistema IEEE de 69 barras	64

Lista de Abreviaturas

CSO	Otimização por enxame competitivo
GA	Algoritmo Genético
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
GD	Geração Distribuída
CAA	Algoritmo de Colônia Artificial de Abelhas
IP	Índice de Penetração
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
FP	Fator de Potência

Lista de Símbolos

P_k^{eq}	Potência Equivalente na barra k
P_k	Carga ativa da barra k
P_j	Potência em cada barra j diretamente conectada após a barra k
PL_{kj}	Perdas ativas nos ramos conectados entre a barra k e as barras j
Q_k^{sh}	Potência reativa shunt injetada na barra k
k, j	Numeração das barras
ub	Limite superior da fonte de alimento (Potência Máxima da GD)
lb	Limite inferior da fonte de alimento (Potência Mínima da GD)
φ	Função que gera valores aleatórios entre $[-1, 1]$
D	Número de Parâmetros a ser otimizado
I_{km}	Corrente no ramo km
V_m	Tensão na barra m
V_k	Tensão na barra k
I_{kj}	Corrente no ramo kj
V_i	Tensão na barra i
V_k	Tensão na barra k
y_{kj}	Admitância ramo kj
S_{kj}^{EQ}	Potência equivalente no ramo kj
F_m	Barras posteriores
r_{km}	Resistência ramo km
x_{km}	Reatância ramo km
P_{perdas}	Perdas Ativas
Q_{perdas}	Perdas Reativas
P_{GD}	Potência ativa da Geração Distribuída
P_{total}	Carga total do sistema analisado
NP	Tamanho da Colônias
$MaxCycle$	Quantidade de iterações
$limit$	Quantidade de tentativas numa mesma fonte de alimento
$runtime$	Quantidade de vezes que o algoritmo realiza a análise
$Foods_{ij}$	Matriz com a posição das fontes de alimento
$fitness_i$	Valor que mede a qualidade do alimento (qualidade da solução)
$Obj.Fun$	Função objetivo
pu	Por unidade
FP_{GD}	Fator de potência da Geração distribuída

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente dependência do fornecimento de eletricidade, tanto nos países desenvolvidos quanto nos países em desenvolvimento, a necessidade de alcançar um nível aceitável de confiabilidade, qualidade e segurança a um preço econômico se torna importante para os clientes e os fornecedores de energia elétrica. Dessa forma, a continuidade, segurança e qualidade do fornecimento de energia elétrica constitui-se como requisito para qualquer sistema de suprimento, logo é necessário que seja bem projetado e mantido adequadamente para atender a essas necessidades (GERS, 2005).

As concessionárias de eletricidade estão buscando novas tecnologias para fornecer qualidade de energia e confiabilidade aceitáveis para seus clientes. Em vista disso, a Geração Distribuída (GD) tem se tornando atraente para muitas empresas e consumidores residenciais, porque essas tecnologias podem produzir energia com menos impacto ambiental, apresentam facilidade na instalação e são altamente eficientes (DANG, 2011).

As GD's são gerações de eletricidade conectada diretamente à rede de distribuição e não à rede de transmissão, com a finalidade de fornecer eletricidade localmente ao invés de distribuir para uma ampla área de consumidores. Do ponto de vista técnico, a GD possui muitos tipos de tecnologias em uma ampla gama de escalas, incluindo eólica, biomassa, fotovoltaico, turbinas a gás de ciclo combinado, microgeração, por exemplo. (HIDAYAT, 2013).

A integração da GD no sistema resultou em vários benefícios. Esses benefícios incluem redução de perda de linha, impactos ambientais reduzidos, pico de corte, aumento da eficiência energética geral, aliviado congestionamento de transmissão e distribuição, suporte de tensão e investimentos diversificados para atualizar os sistemas de geração, transmissão e distribuição existentes. Com base nesses benefícios, um sistema de distribuição de energia deve possuir melhor desempenho e confiabilidade quando há no sistema gerações distribuídas de diversas capacidades em diferentes pontos. (CHIRADEJA, 2005)

A proposta deste trabalho, consiste em realizar o dimensionamento e a alocação ótima da GD no sistema de distribuição radial a partir da análise de redução das perdas do sistema utilizando o método de algoritmo da colônia artificial de abelhas (CAA) para otimização do mesmo.

1.1. Objetivos

1.1.1. Geral

Realizar otimização da dimensão e alocação da GD em um sistema de distribuição radial com o objetivo de reduzir as perdas no sistema, utilizando-se do método do algoritmo da colônia de abelhas.

1.1.2. Específico

- Aplicar o algoritmo de colônia artificial de abelhas para o dimensionamento ótimo das GD's;
- Reduzir as perdas do sistema com base na alocação e dimensionamento da GD;
- Otimizar o dimensionamento e a localização da GD em um sistema de distribuição radial;
- Comparar os resultados obtidos com o Algoritmo de Colônia Artificial de Abelhas utilizado para o sistema IEEE 33 barras e IEEE 69 barras em relação a outras heurísticas.

1.2. Justificativa

No sistema elétrico de potência o controle do funcionamento adequado do sistema é de suma importância para fornecer a energia elétrica de qualidade. Devido ao fato da GD apresentar a capacidade de melhorar o perfil de tensão, flexibilidade para o local de instalação, confiabilidade e injetar potência ativa na rede, além de benefícios econômicos, o estudo da alocação ótima dessas gerações apresenta viabilidade de estudo relacionada à melhoria do desempenho do sistema.

Além disso, atualmente, os sistemas elétricos são monitorados através de supervisórios e algoritmos que, a partir da análise do fluxo de potência, possibilitam descrever o estado da rede, como por exemplo os algoritmos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson. Logo, se torna necessário realizar um estudo dessas GD no sistema de distribuição com relação ao suas dimensões e sua localização para que possibilitem um fluxo de potência e perfil de tensão adequados, respeitando suas restrições e impactos no sistema, como também, é necessário realizar essa análise utilizando métodos heurísticos mais recentes como algoritmo de colônia artificial de abelhas (CAA) para buscar resultados com menor tempo de processamento.

1.3. Estado da arte

O presente trabalho tem por objetivo propor um modelo de otimização de alocação de geração distribuída no sistema de distribuição do sistema IEEE 33 e 69 barras para redução das perdas no sistema e para análise comparativa dos resultados obtidos. Neste contexto de alocação ótima de geração distribuída existe diversos trabalhos publicados que utilizam técnicas heurísticas para otimização como o algoritmo das abelhas, PSO (Enxame de partículas), GA (Algoritmo Genético) e CSO (Otimização por enxame competitivo).

Em SHRIVASTAVA (2012), o algoritmo de busca de grade clássico, baseado em fluxos de carga sucessivos, foi empregado para obter a localização e o tamanho ideal de várias unidades GD na rede do sistema de energia radial, a fim de minimizar as perdas totais de energia ativa e melhorar o perfil de tensão do sistema. O método proposto é testado em alimentador de distribuição radial de 12 barramentos.

MAHMOUD, et al (2015) propõem um método de Eficiência Analítica (EA) para instalação ótima das gerações distribuídas com capacidades variadas e definidas pelo próprio método. Além disso, o método EA também é integrado ao algoritmo de otimização do fluxo de potência para assim desenvolver um método novo. A otimização é realizada para os sistemas IEEE 33 e IEEE 69 barras

SANNIGRAHI, et al (2017) apresenta uma técnica analítica baseada em índice de estabilidade de tensão (do inglês VSI) para localização e dimensionamento da geração distribuída em redes de distribuição. Uma nova formulação é desenvolvida para uma única função objetivo. A alocação ótima é feita com base em diferentes tipos de geração distribuídas e analisado qual o mais adequado para integração no sistema.

No trabalho de TEJA et al (2014) é realizado a análise da localização ideal de GD em um sistema de distribuição em malha e desbalanceado. A localização é determinada utilizando a análise do índice de tensão e o dimensionamento da GD é feito com algoritmo da técnica variacional. A análise do posicionamento ideal é feita com base na variação do fator de potência.

Em MORADI et al (2012), um híbrido Algoritmo Genético (GA) com a otimização pelo enxame de partículas (PSO) é utilizado para o problema de localização e dimensionamento ideal de GD em um sistema de distribuição IEEE de 33 e 69 barras. O objetivo é minimizar a perda de energia da rede e melhorar a regulação da tensão com o enquadramento das restrições operacionais e de segurança do sistema nos sistemas de distribuição radial.

MAGADUM (2018) realiza a análise da otimização da alocação e dimensionamento da GD de um sistema de 5 barras em malha no *software MiPower®*. A alocação ótima é definida através da análise do fluxo de potência utilizando Newton Raphson para cenários distintos da GD.

Em GUPTA (2017) é realizada a colocação ideal de múltiplos GD's e Compensador Estático de Distribuição (D-STATCOM) em um sistema de distribuição radial, o que resulta na redução de perdas de linha e na Distorção Harmônica Total. A localização ideal de GD e D-STATCOM é determinada pelo índice de estabilidade. O tamanho ideal de GD e D-STATCOM é determinado usando a técnica de variação, aumentando o tamanho em etapas. A análise do fluxo de carga e o fluxo harmônico são realizados no sistema de barramento IEEE 34 barras, com as fontes harmônicas injetadas como fontes de corrente.

ALHAMALI (2017) apresenta uma técnica de otimização baseada no algoritmo genético (GA) em conjunto com o método de fluxo de potência é usada para melhorar o desempenho da rede de distribuição e identificar a melhor localização e tamanho das GD's. O principal objetivo da função de otimização é reduzir as perdas da rede e regular o nível de tensão sob diferentes condições de carga.

Em NAGABALLI (2018), a localização e capacidade ideal é determinada utilizando o sistema *fuzzy* em conjunto com Algoritmo Genético (GA) e o sistema *fuzzy* com o PSO é usado para projetar o tamanho ideal de GD para o sistema de teste de distribuição radial IEEE padrão de 33 barras. É feita uma comparação entre os resultados do híbrido PSO-Fuzzy, GA-Fuzzy e o método analítico.

KUMARAPPAN (2016) investiga a instalação ideal de várias unidades de geração distribuída na rede de distribuição radial usando o algoritmo de otimizador de enxame competitivo (CSO). O método utilizado tem como objetivo reduzir as perdas do sistema analisado.

ABU-MOUTI (2011) apresenta uma nova abordagem de otimização que emprega um algoritmo de Colônia Artificial de Abelhas (CAA) para determinar o tamanho, o fator de potência e a localização ideais da unidade GD, a fim de minimizar a perda total de energia real do sistema. Os resultados verificam que o algoritmo CAA é eficiente, robusto e capaz de lidar com problemas de otimização não linear inteiros mistos.

ABU-MOUTI (2009) propõem o algoritmo CAA modificado, é considerado o problema de determinar o tamanho, localização e fator de potência ideais para uma geração distribuída para minimizar a perda total de energia real do sistema. A análise é feita para os sistemas IEEE 33 e 69 barras são examinados. Os resultados verificam que o algoritmo CAA modificado possui excelentes características de qualidade e convergência da solução.

No trabalho de MOHANDAS et al (2015), são consideradas unidades GD de potência real e modelo de carga de energia constante e outros modelos de carga dependentes de tensão, como industrial, residencial e comercial. É utilizado o algoritmo CCAA (Do inglês *Chaotic Artificial Bee Colony*), a eficácia do algoritmo proposto é validada testando-o em um sistema de distribuição radial IEEE de 38 e 69 barras.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Sistema Elétrico de Potência

Os Sistemas Elétricos de Potência podem ser definidos como elementos e equipamentos elétricos que trabalham em conjunto e de forma coordenada, com o intuito de produzir, transportar e distribuir energia elétrica do ponto de geração até os grandes centros consumidores. Essa operação de conversão e entrega de energia do sistema tem como premissa a continuidade, qualidade e economia em todos os processos (SHAHNIA, 2018).

Conforme Figura 1, a estrutura do sistema elétrico de potência tem como finalidade entregar a energia gerada até o consumidor, que muitas das vezes não está próximo dos pontos de geração necessitando dos elementos da transmissão para transportar essa energia até o centro de consumo. Além disso, o sistema deve atender as regulamentações de como essa energia deve chegar até o consumidor.

Figura 1 - Sistema Elétrico de Potência



Fonte: QUANTA, 2019.

Todavia, o sistema elétrico possui outros elementos intrínsecos aos elementos de geração, transmissão e distribuição conforme Figura 2.

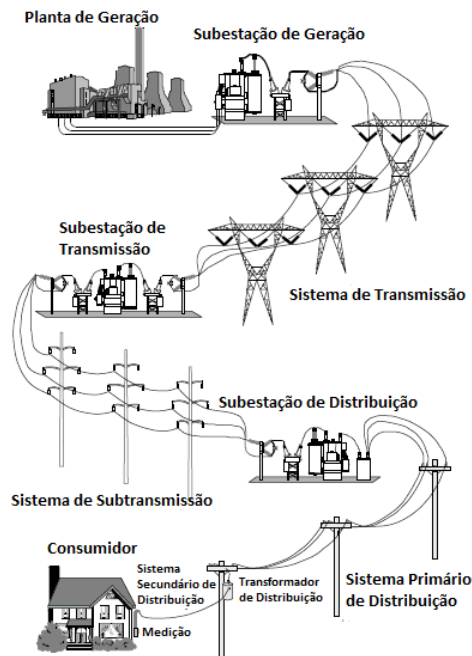
Segundo Brown (2008), podemos descrever as etapas da Figura 2 da seguinte forma:

- Geração

As usinas de geração consistem em uma ou mais unidades geradoras que convertem energia mecânica em eletricidade, transformando um motor principal acoplado a um gerador elétrico produzindo um nível de tensão linha a linha entre 11 *kV* e 30 *kV*. Devem atender a três premissas, primeiro a capacidade de geração disponível deve ser maior que a demanda de carga, mais as perdas do sistema. Em segundo lugar, o sistema deve ser capaz de transportar energia exigida aos clientes sem sobrecarregar o equipamento. Terceiro, os clientes devem ser atendidos dentro de uma faixa de tensão aceitável.

As subestações de geração conectam as usinas de geração às linhas de transmissão por meio de um transformador elevador que aumenta a tensão para os níveis de transmissão.

Figura 2-Sistema Elétrico de Potência em todas as etapas



Fonte: Brown, 2008.

- **Transmissão**

Os sistemas de transmissão têm por finalidade transportar a eletricidade por longas distâncias de instalações de geração de energia a subestações que atendem sistemas de subtransmissão ou distribuição. Para aumentar a flexibilidade e melhorar a confiabilidade, as linhas de transmissão são interconectadas nas estações de comutação de transmissão e nas subestações de transmissão. E realizam o transporte em níveis de tensão de 138 kV , 345 kV , 440 kV , em corrente alternada a 1000 kV em corrente contínua.

- **Subsistema de Transmissão**

Os subsistemas de transmissão transportam eletricidade das subestações de transmissão para subestações de distribuição. Os níveis típicos de tensão variam de acordo a região podendo ser em valores de $34,5\text{ kV}$, 46 kV , 69 kV , 115 kV , 138 kV , 161 kV e 230 kV .

- **Distribuição**

Os sistemas de distribuição têm por finalidade distribuir a energia que chega da subtransmissão para o consumidor. Para isso, as subestações de distribuição recebem energia

das linhas de subtransmissão e diminuem as tensões com transformadores de potência. Esses transformadores são responsáveis por transmitir em níveis de tensão de 13,8 kV, 34,5 kV, 6,9 kV que em seguida são convertidos para níveis secundários 220 V, 127 V, 380 V e 440 V.

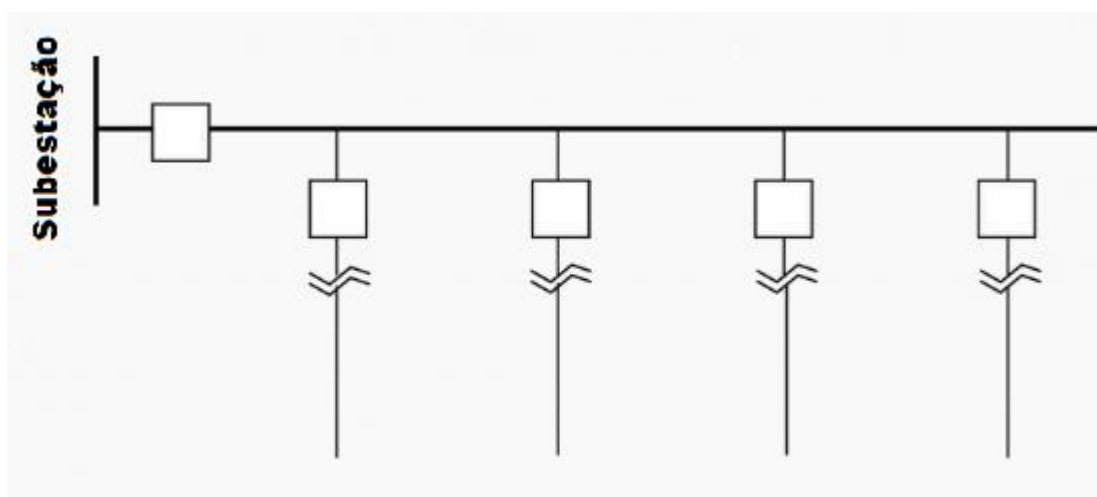
2.2. Sistema de distribuição

O sistema de distribuição começa com a subestação de distribuição que é alimentada por uma ou mais linhas de subtransmissão. Em alguns casos, a subestação de distribuição é alimentada diretamente de uma linha de transmissão de alta tensão, caso em que provavelmente não há sistema de subtransmissão. Cada subestação de distribuição servirá um ou mais alimentadores primários. Com rara exceção, os sistemas são radiais, o que significa que há apenas um caminho para a energia fluir da subestação de distribuição para o usuário. (KERSTING, 2006).

Segundo Sallam (2018) a configuração dos sistemas de distribuição tem como desvantagem a maior possibilidade de interrupção do cliente devido as redes serem de grandes extensões. Essas configurações podem ser classificadas em:

- Sistema radial em que a carga é fornecida através de um sistema radial de acordo a Figura 3;

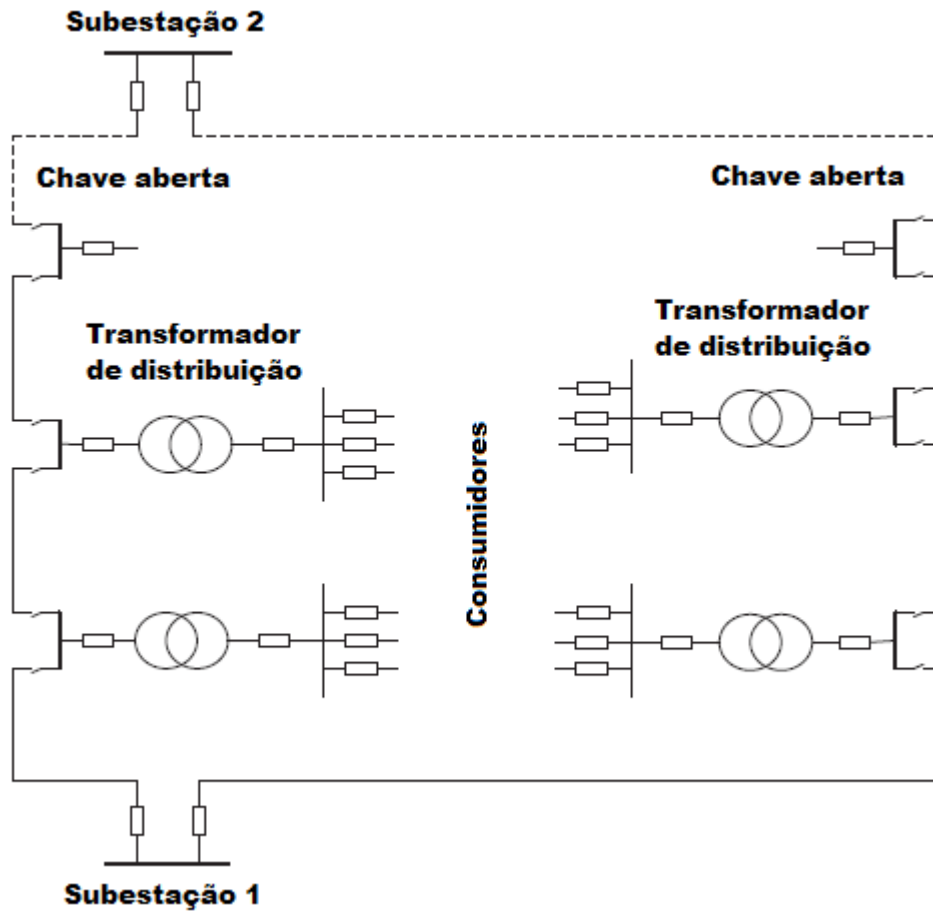
Figura 3- Sistema Radial



Fonte: CSANYI, 2016.

- Sistema de anel aberto em que a carga é fornecida através de um dos dois alimentadores disponíveis, ou seja, um lado do anel, conforme a Figura 4;

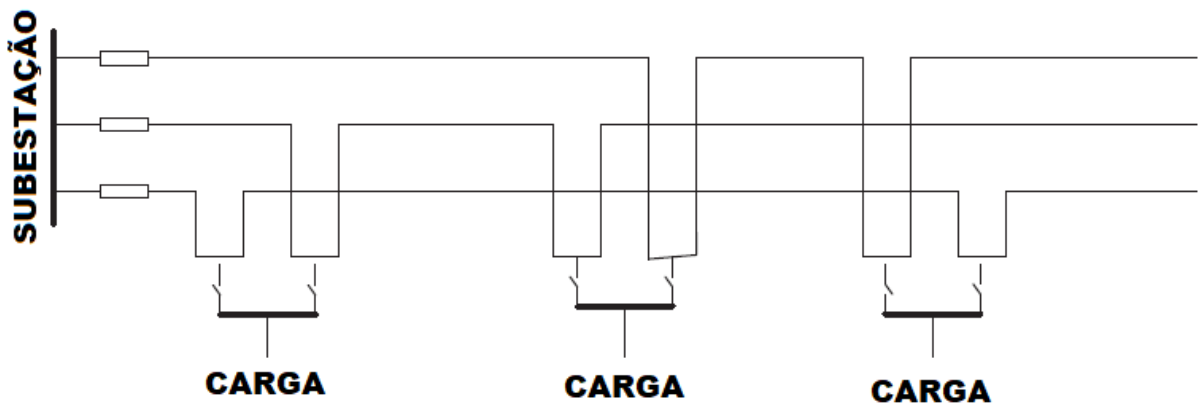
Figura 4-Sistema anel aberto



Fonte: SALLAM, 2018.

- Sistema multirradial, o que significa suprir a carga por mais de um sistema radial, de acordo Figura 5.

Figura 5- Sistema Multirradial

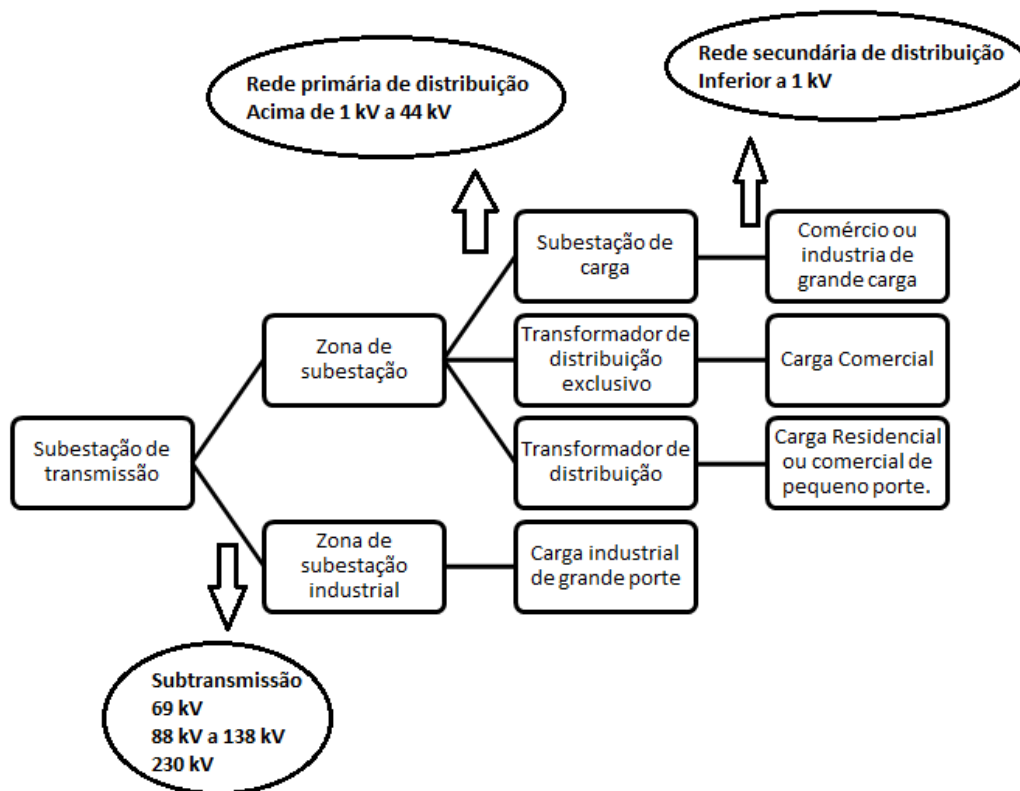


Fonte: SALLAM, 2018.

Conforme Figura 6 o sistema de distribuição é responsável por atender a cada tipo de carga que o consumidor necessita. Essa classificação é feita pelo nível de tensão entregue ao

consumidor e a mesma é baseada no tipo de carga demandada para seu uso de acordo ao que é definido aos órgãos de regulamentação.

Figura 6 - Estrutura do sistema de distribuição



Fonte: (Módulo 2 PRODIST, 2018).

É necessário conhecer e entender profundamente os problemas do sistema, bem como projetar, planejar e desenvolver técnicas e critérios de operação para resolver e satisfazer as restrições de confiabilidade de forma a satisfazer e beneficiar os consumidores, bem como as concessionárias de energia elétrica (BILLINTON, 1984).

2.3. Fluxo de Potência Radial

O cálculo de fluxo de potência para sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica tem como essência a determinação do estado da rede, da distribuição dos fluxos e de algumas grandezas de interesse como magnitude de tensão, potência e ângulo de fase. Trata-se de uma modelagem estática onde um conjunto de equações e inequações algébricas são responsáveis por representar a rede. Esse tipo de representação é utilizado em situações nas quais as variações com o tempo são suficientemente lentas para que se possam ignorar os efeitos transitórios (MONTICELLI, 1983).

A análise do fluxo de potência é feita com o objetivo de minimizar as perdas de energia ativa, minimizar as operações de controle. Para isso, são necessárias tratar as restrições. Essas restrições são:

- Geração e balanceamento de carga;
- Limites de potência ativa e reativa do gerador;
- Limites de fluxo de carga de ramificação e linha de junção;
- Limites de tensão de barramento;
- Limites nas variáveis de controle.

Ou seja, as restrições nas variáveis de controle não são arbitrárias, pois a geração de energia deve estar dentro das restrições de demanda de carga e perdas de transmissão. Há uma ampla gama de valores de controle para os quais essas restrições podem ser satisfeitas e é necessário selecionar um desempenho que busque um índice de desempenho desejado (DAS, 2017).

Para realizar o cálculo de fluxo de potência em redes transmissão são utilizados métodos iterativos clássicos tais como Newton-Raphson, desacoplado rápido, Gauss-Seidel, entre outros. Contudo, esses métodos não apresentam desempenho adequado para sistemas radiais, pois para esse tipo de topologia esses métodos apresentam divergência no processo iterativo e podem exigir grandes números de iteração para convergir em uma solução (CANOSSA, 2007)

Segundo (SRINIVAS, 2000) os métodos clássicos utilizados no fluxo de potência apresentam baixo desempenho, pois os sistemas de distribuição radial possuem características, tais como, altas taxas de r/x , carga desbalanceada e operação multi-fase desbalanceada. Para isso, são utilizados dois métodos, o método soma de potência e o método da soma de corrente.

O método da soma de potência é de caráter iterativo e pode ser dividido em etapas da seguinte forma (FALCÃO, 2003):

- a. Cálculo das potências equivalentes em cada barra, partindo das barras mais extremas até a barra de geração;
- b. Cálculo das tensões nodais em cada barra, partindo da barra de geração até as barras terminais, uma vez que a tensão da barra fonte é conhecida;
- c. Verificação da convergência: módulo da diferença entre tensões em iterações sucessivas menor que tolerância especificada;
- d. Se não houver convergência, cálculo das perdas nos ramos, no sentido das barras terminais para a barra fonte. Retorne à etapa (a).
- e. O cálculo das potências equivalentes em cada barra k é realizado através da (1 e (2.

$$P_k^{eq} = P_k + \sum P_j + \sum PL_{kj} \quad (1)$$

$$Q_k^{eq} = Q_k + \sum Q_j + \sum QL_{kj} + Q_k^{sh} \quad (2)$$

Onde, os termos são:

P_k^{eq} - Potência equivalente da barra k;

P_k - Carga ativa da barra k;

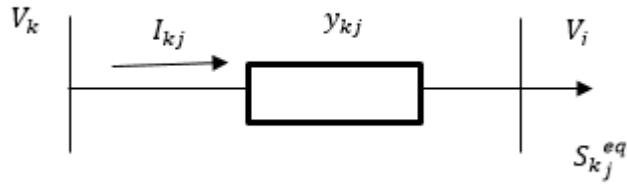
P_j - Potência em cada barra j diretamente conectada após a barra k;

PL_{kj} - Perdas ativas nos ramos conectados entre a barra k e as barras j;

Q_k^{sh} - Potência reativa shunt injetada na barra k, podendo ser negativa para injeção capacitiva e positivo para injeção indutiva.

Para realizar os cálculos de tensões nodais em cada barra k é considerado o seguinte modelo:

Figura 7-Modelo de uma rede radial.



Fonte: FALCÃO, 2011.

Com o modelo descrito na Figura 7 e sabendo que V_k é a tensão na barra k, I_{kj} é a corrente no ramo, y_{kj} a admitância do ramo, V_i a tensão na barra i e S_{kj}^{eq} a potência dissipada.

A partir disso podemos aplicar a (3) e (4).

$$S_j^{eq} = P_j^{eq} + jQ_j^{eq} = -V_j I_{jk}^* \quad (3)$$

$$I_{jk} = y_{kj}(V_j - V_k) \quad (4)$$

A partir das equações (3) e (4) podemos definir a potência como apresentado na Equação

5.

$$S_j^{eq} = -V_j [y_{kj}(V_j - V_k)] \quad (5)$$

Sabendo também que, conforme apresentam as Equações 6 a 8.

$$y_{kj} = g_{kj} + jb_{kj} = |y_{kj}| \angle \phi_{kj} \quad (6)$$

$$V_j = |V_j| \angle \theta_j \quad (7)$$

$$V_k = |V_k| \angle \theta_k \quad (8)$$

Pela relação trigonométrica, sabemos que as potências ativas e reativas podem ser separadas em senos e cossenos, como também, da relação trigonométrica fundamental ($\sin^2 + \cos^2 = 1$), podemos chegar a uma equação biquadrada como apresenta, da Equação 9 a 12 (FALCÃO, 2003):

$$A|V_j|^4 + B|V_j|^2 + C = 0 \quad (9)$$

$$A = g_{kj}^2 + b_{kj}^2 \quad (10)$$

$$B = 2(P_j^{eq} g_{kj} - Q_j^{eq} b_{kj}) - y_{kj}^2 |V_k|^2 \quad (11)$$

$$C = (P_j^{eq})^2 + (Q_j^{eq})^2 \quad (12)$$

O módulo da tensão na barra j é obtido pela solução da equação biquadrada. Por outro lado, a fase da tensão na barra j é obtida pela Equação 13, enquanto que as perdas são obtidas pela Equação 14 e 15 (FALCÃO, 2003):

$$\theta_j = \theta_k + \phi_{kj} + \arctan \left(\frac{Q_j^{eq} - b_{kj} |V_j|^2}{P_j^{eq} + g_{kj} |V_j|^2} \right) \quad (13)$$

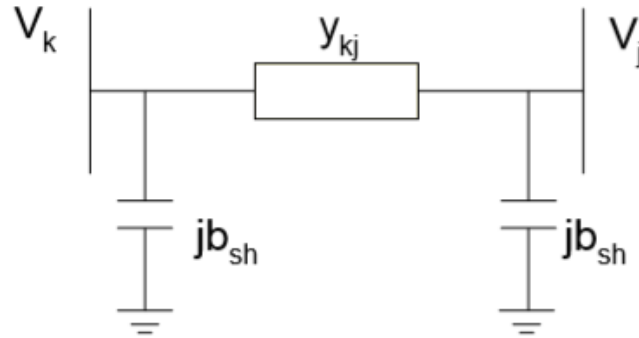
$$PL_{kj} = |I_{kj}|^2 r_{kj} = \left(\frac{|S_j^{eq}|}{|V_j|} \right)^2 r_{kj} \quad (14)$$

$$QL_{kj} = |I_{kj}|^2 x_{kj} = \left(\frac{|S_j^{eq}|}{|V_j|} \right)^2 x_{kj} \quad (15)$$

Todavia, as equações para os modelos dos componentes utilizados em sistemas de distribuição são descritas de maneira distinta em comparação as equações de 3 a 5 deduzidas para ramos compostos apenas por uma impedância serie.

- Linhas e Trechos de Alimentadores:

Figura 8-Modelo π Para Linhas e Trechos do Alimentador



Fonte: FALCÃO, 2011.

Do modelo da Figura 8, pode-se obter, a partir da análise nodal, a Equação 16 e 17:

$$I_{kj} = y_{kj}(V_k - V_j) + jb_{sh}V_k \quad (16)$$

$$I_{jk} = y_{kj}(V_j - V_k) + jb_{sh}V_j \quad (17)$$

Portanto, na etapa de cálculo das tensões nodais, os parâmetros A, B e C da equação biquadrada e a fase da tensão na barra j valem, conforme apresentada na Equação 18 a Equação 21:

$$A = g_{kj}^2 + (b_{kj} + b_{sh})^2 \quad (18)$$

$$B = 2[P_j^{eq} g_{kj} - Q_j^{eq}(b_{kj} + b_{sh})] - y_{kj}^2 |V_k|^2 \quad (19)$$

$$C = (P_j^{eq})^2 + (Q_j^{eq})^2 \quad (20)$$

$$\theta_j = \theta_k + \phi_{kj} + \arctan\left(\frac{Q_j^{eq} - (b_{kj} + b_{sh})|V_j|^2}{P_j^{eq} + g_{kj}|V_j|^2}\right) \quad (21)$$

As perdas do sistema são determinadas a partir do cálculo de potência em ambos os sentidos, ou seja,

$$PL_{ij} = P_{ij} + P_{ji} \quad (22)$$

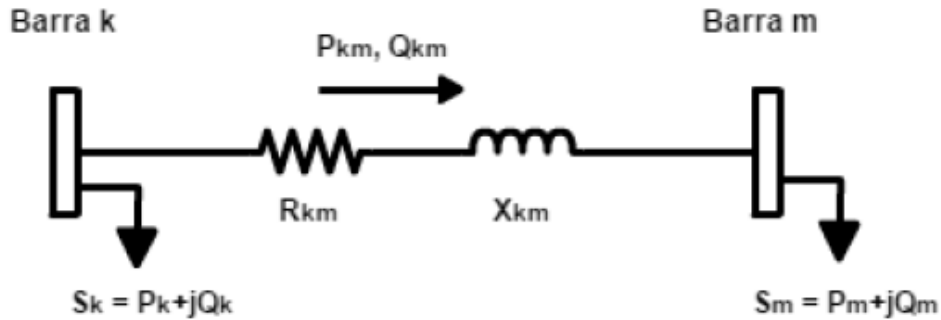
$$QL_{ij} = Q_{ij} + Q_{ji} \quad (23)$$

- Cargas

As cargas podem ser modeladas como potência constante e no modelo Zip, esse segundo é utilizado para cargas que podem variar com a tensão. Contudo, para esse trabalho as cargas (potência consumida) serão consideradas como fixas.

Com relação ao método da soma de corrente é possível encontrá-lo com maior frequência em métodos computacionais para sistemas radiais. Também conhecido como método de varredura reversa (*backward sweep*) e varredura direta (*forward sweep*), o mesmo foi adotado neste trabalho. Portanto, para o método da soma de corrente, tem-se a modelagem da Figura 9.

Figura 9- Modelo de ramo para um sistema de distribuição radial



Fonte: GONTIJO, 2017.

Segundo (GONTIJO, 2017) a tensão de referência é tomada como base para as demais barras do sistema e então na etapa reversa temos que a corrente no ramo indicado pela Figura 9 é dado por:

$$I_{km} = I_m + \sum_{j \in F_m} I_{mj} \quad (24)$$

Ou seja, a corrente no ramo é dada pela soma da corrente na barra posterior com o somatório das correntes de total de barras posteriores (F_m) que estão no sentido do fluxo de potência (a jusante). Esse procedimento é feito no sentido montante do sistema até chegar no alimentador.

Em seguida, para a etapa direta são realizados os cálculos de tensão nas barras iniciando-se da barra de geração principal até as extremidades da rede, para isso utiliza-se o seguinte equacionamento:

$$V_m = V_k - (R_{km} + jX_{km}) * I_{km} \quad (25)$$

Finalmente, após essas etapas cumpridas determina-se as perdas ativas e reativas pela seguinte equação:

$$P_{perdas} = \sum_{(k,m) \in \Omega} R_{km} (I_{km})^2 \quad (26)$$

$$Q_{perdas} = \sum_{(k,m) \in \Omega} X_{km} (I_{km})^2 \quad (27)$$

Onde Ω é o conjunto com todos os ramos do sistema analisado.

2.4. Geração Distribuída

O termo Geração Distribuída (GD) é utilizado para designar a geração de energia elétrica realizada junto ou próxima dos consumidores independente da potência, tecnologia e fonte de energia. A GD inclui:

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

Além de possuir equipamentos de medida, controle e comando que articulam a operação dos geradores e o eventual controle das cargas para obter um uso mais eficiente da energia fornecida.

A GD se destaca com relação as grandes gerações centrais no quesito da localização, pois economiza investimentos em transmissão, uma vez que está próximo dos consumidores e reduz as perdas nestes sistemas, melhorando a estabilidade do serviço de energia elétrica. (INEE, 2019).

Segundo (ANEEL, 2016) é permitido o uso de qualquer fonte renovável, além da cogeração qualificada, denominando-se microgeração distribuída a central geradora com potência instalada até 75 kW e minigeração distribuída aquela com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW, conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

A GD é um tipo de produção de energia que está no local ou próximo ao centro de carga e está interconectado ao sistema de distribuição. O principal objetivo das técnicas de alocação de GD é minimizar as perdas de sistemas de energia. No entanto, outros objetivos, como melhorar o perfil de tensão, a confiabilidade, maximizar a capacidade da GD e minimizar custos. Essa minimização é medida através do Índice de Penetração (IP) que é dada pela Equação (28):

$$IP = \frac{P_{GD}}{P_{total}} \quad (28)$$

Onde,

P_{GD} (kW)- Potência gerada pela GD

P_{total} - Carga total do sistema de distribuição

Esse índice mede o grau de inserção da GD no sistema, tal parâmetro deve ser conhecido, pois a GD proporciona vantagens e por consequência impactos no sistema e por conta disso existem restrições que devem ser respeitadas (SHAYANI, 2010)

A plenitude das vantagens da GD justifica o planejamento de sistemas elétricos na presença da GD. Algumas razões importantes para o uso cada vez mais amplo da GD podem ser resumidas como apresenta em (JEGADEESAN, 2014):

- As unidades de GD estão mais próximas dos clientes;
- A tecnologia mais recente disponibilizou plantas com alta eficiência e amplitude de capacidade ampliada (variando de 10kW a 15MW);
- Facilidade em encontrar locais para pequenos geradores;
- O gás natural como combustível nas estações de GD é facilmente acessível e os preços são mais estáveis;
- Geralmente, as plantas GD requerem tempos de instalação mais curtos e o risco de investimento não é muito alto;
- As plantas GD produzem eficiências razoavelmente boas, especialmente na cogeração e em ciclos combinados (plantas maiores);

Além desses benefícios a GD também pode, do ponto de vista técnico (GRAHAM, 2000):

- Minimizar as perdas de energia;
- Possibilita a redução das cargas na barra em que está conectada;
- Melhorar o nível de tensão na barra em que está inserida;
- Proporcionar a redução de carga no sistema de distribuição a medida que aumenta a inserção da GD;
- Elevação dos níveis de curto-circuito do sistema de distribuição (capacidade limitada, ou seja, a inserção da GD no sistema aumenta a corrente elétrica do mesmo).

2.5. Qualidade de energia

No módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018), são estabelecidos os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente, fator de potência, dentre outros parâmetros. Sendo que:

- Nível de tensão

A tensão a ser contratada nos pontos de conexão com tensão nominal de operação inferior a 230 kV deverá situar-se entre 0,95 pu e 1,05 pu da tensão nominal de operação do sistema no ponto de conexão.

- Fator de Potência

Para unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo.

2.6. Algoritmo Colônia Artificial de Abelhas

O Algoritmo Colônia Artificial de Abelhas (CAA) consiste em uma ferramenta bio-inspirada que se baseia no comportamento coletivo desses insetos na busca da sobrevivência da colmeia. A organização coletiva das abelhas está diretamente relacionada com algumas regras simples do comportamento individual do inseto.

Para realizar a coleta do néctar para produção de alimento existem mecanismos de comunicação que as abelhas usam de forma extremamente organizada que compartilham informações eficientes como qualidade, quantidade e distância do alimento. Essa comunicação pode ser feita por meio de sons, substâncias químicas, tato, danças ou estímulos eletromagnéticos. A dança é principal meio de comunicação, pois por meio dela as operárias conseguem a distância e a localização de uma fonte de alimento (SERAPIÃO, 2009).

Quando as fontes de alimento se tornam escassas a colônia de abelhas deve acumular comida suficiente no verão para poder ter alimento durante todo o inverno. A coleta de alimentos é feita pelas abelhas operárias. A colônia de abelhas coordena sua atividade de coleta de uma maneira eficiente, enviando as abelhas em múltiplas direções simultaneamente para explorar uma grande área de busca. A colônia de abelhas concentra, então, a busca nas fontes de néctar mais proveitosas dentre todas da florada (BAHAMISH et al., 2008).

Tais características da colônia de abelhas permitem classificá-las como enxame inteligente, pois são estabelecidas regras básicas para a interação entre os agentes (auto-organização) e diversas tarefas são realizadas simultaneamente por indivíduos especializados proporcionando uma organização do trabalho (divisão do trabalho).

O processo de busca e aquisição do alimento as abelhas campeiras após encontrar o néctar, retorna à colmeia transferindo o néctar para uma abelha operária que o armazena. Em seguida, a abelha pode:

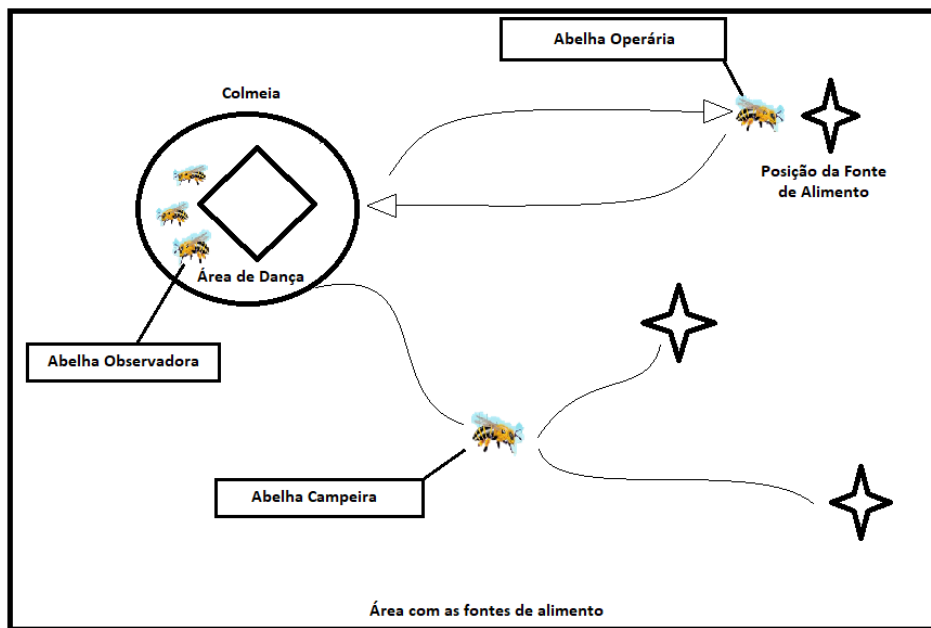
- a. Abandonar a fonte de alimento e tornar-se novamente uma exploradora;

- b. Continuar a coleta na fonte de alimento sem recrutar as companheiras;
- c. Dançar e assim recrutar as companheiras antes de retornar para a fonte de alimento.

A dança das abelhas campeiras tem como propósito a indicação da direção da fonte de alimento em relação a posição da colmeia, como também indicar para as abelhas operárias a qualidade da fonte de alimento encontrada. O recrutamento aumenta com a vivacidade e a duração da dança (SERAPIÃO, 2009).

Para essa bio-inspiração existem diversos modelos de abordagem em algoritmos das abelhas, entretanto o algoritmo aplicado neste trabalho é Colônia de Abelhas Artificiais (CAA do inglês *Artificial Bee Colony*). Nesse algoritmo temos as seguintes proposições para a busca do alimento, conforme apresenta a Figura 10 (KARABOGA, 2007).

Figura 10-Ilustração da busca por alimento realizado pelas abelhas



Fonte: Própria.

Da Figura 10, temos que:

- A posição de uma fonte de alimento representa uma solução possível do problema de otimização;
- A quantidade de néctar corresponde à qualidade ou medida de aptidão para a solução da função objetivo;
- A colônia de abelhas artificiais consiste de três grupos de abelhas operárias: campeiras e escudeiras.

- As abelhas campeiras estão associadas com uma fonte de alimento particular, a qual estão explorando. Elas carregam a informação sobre essa fonte particular e compartilham essa informação com uma certa probabilidade através da dança;
- A abelha observadora espera na pista de dança para tomar a decisão de qual fonte de alimento escolher para explorar, ou seja, se tornar uma abelha campeira.
- O valor da probabilidade com o qual a fonte de alimento é preferida pelas seguidoras aumenta, quando a quantidade de néctar de uma fonte de alimento aumenta.
- A primeira metade da colônia consiste em abelhas campeiras e a segunda metade de observadoras.
- Para toda fonte de alimento existe uma abelha campeira, ou seja, o número de abelhas campeiras é igual ao número de fontes de alimento em torno da colmeia.

É possível descrever o algoritmo CAA como apresentado em (DUARTE, 2015):

Algoritmo Colônia Artificial de Abelhas (CAA):

Inicializa:

- A População da Colônia (NP);
- O Número de Fontes de Alimento (NP/2);
- O Limite de Tentativas Para uma Mesma Fonte de Alimento;
- Determina a faixa de variação da qualidade da fonte de alimento (limite superior e inferior).

Enquanto (Número Máximo de ciclos não for atingido)

- Posiciona as abelhas campeiras em fontes de alimento aleatórias dentro da faixa de variação;
- Calcula a probabilidade de escolha da fonte por abelhas observadoras;
- Posicione as abelhas observadoras nas fontes de alimento dependendo de seus valores;
- Descarta fontes ruins;
- Envia abelhas campeiras para buscar novas fontes de alimento;
- Memorize a melhor fonte de alimento encontrada até o momento;

Fim enquanto

Fim

Na aplicação de algoritmos de otimização o ajuste dos parâmetros é o principal agente responsável pelo desempenho do algoritmo, influenciando diretamente na possibilidade de convergência da função objetivo. Contudo, o algoritmo CAA possui poucos parâmetros de

controle o que torna uma vantagem com relação a outros métodos. Por outro lado, a inicialização da população se dá de forma aleatória e caso a região gerada não seja de solução adequadas, seu desempenho irá direcionar para região viável o suficiente (KARABOGA, 2007).

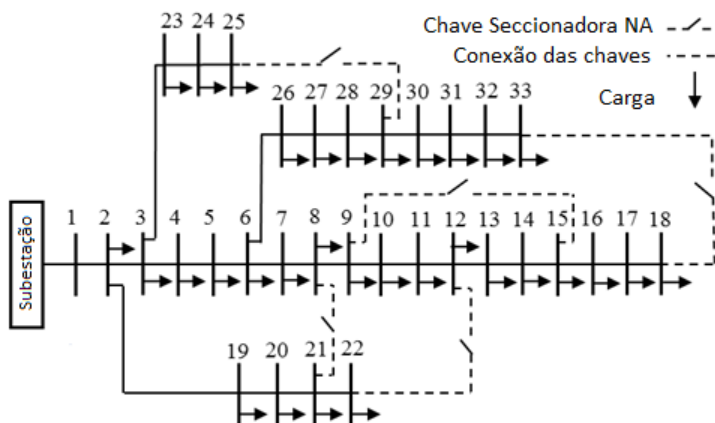
2.7. Sistemas utilizados para a aplicação do CAA

Os sistemas que foram adotados neste trabalho são do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) de 33 barras e 69 barras. Para ambos sistemas foram considerados como tensão de base de 12,66 kV e potência base de 100 MVA. Para a análise do comportamento do sistema com a inserção de GD's foram considerados que as cargas instaladas nas barras são constantes e que se trata de um sistema balanceado.

- **IEEE 33 barras**

Nesse sistema da Figura 11 a carga total é de 3715 kW e 2290 kVAr. Além disso, tem-se as seguintes características, de acordo Tabela 1.

Figura 11- Diagrama Unifilar do Sistema de 33 barras



Fonte: WAZIR, 2016.

Tabela 1- Características do Sistema de 33 barras

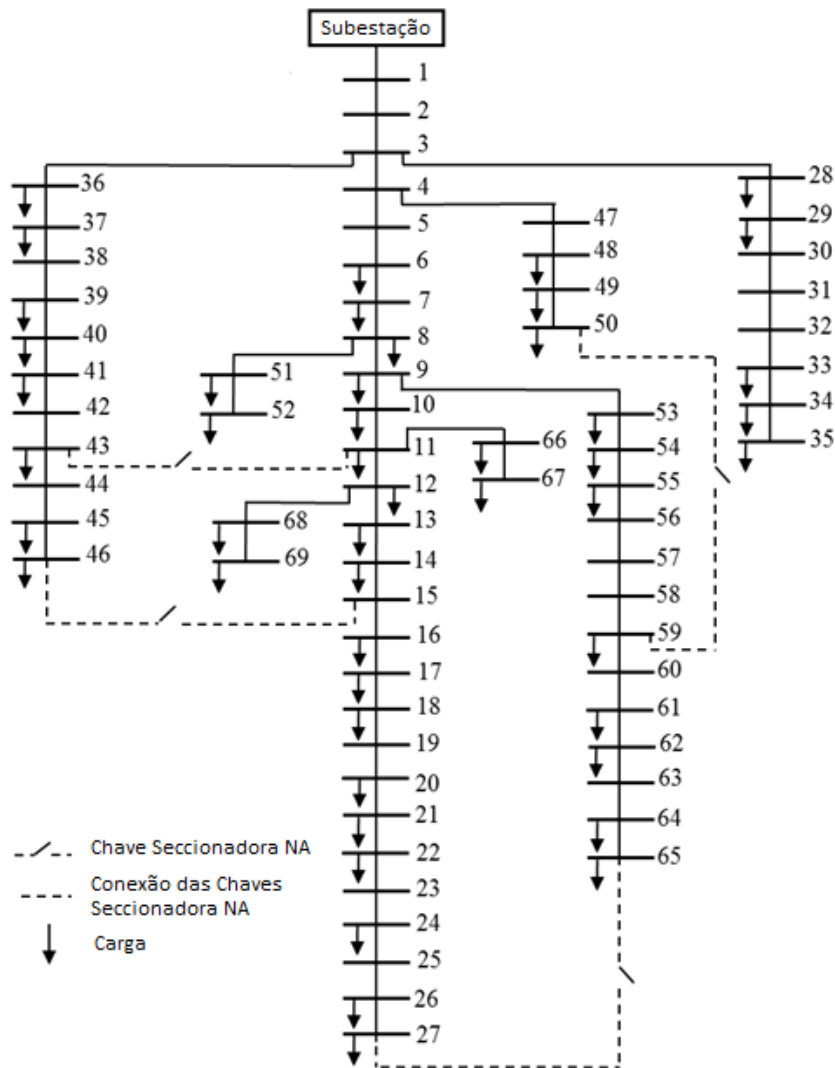
	BARRAS	SUBESTAÇÃO	DERIVAÇÕES	BARRA DE CARGA
QUANTIDADE	33	1	3	32

Fonte: Própria.

- **IEEE 69 barras**

No sistema da Figura 12, a carga total do sistema é de 3792 kW e 2300 VAR. Com relação as características do sistema, na Tabela 2 apresenta as informações do sistema.

Figura 12-Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 69 barras



Fonte: ZIMMERMAN, 2010.

Tabela 2- Características do Sistema de 69 barras

	<i>BARRAS</i>	<i>SUBESTAÇÃO</i>	<i>DERIVAÇÕES</i>	<i>BARRA DE CARGA</i>
<i>QUANTIDADE</i>	69	1	7	43

Fonte: Própria.

3. METODOLOGIA

Para a análise da alocação e dimensionamento ótimo da GD foram utilizados os sistemas radiais IEEE 33 e IEEE 69 barras. Isso se deu através de linguagem de programação no software MATLAB® versão 2016a em um computador Lenovo com sistema operacional Microsoft Windows 10 Home com processador Intel® Core™ i3-3110M, 2,4 GHz, 4 GB de RAM e sistema operacional de 64 bits.

Para o desenvolvimento do algoritmo para o cálculo do fluxo de potência radial e para o processo de busca com algoritmo CAA foram utilizados como referência os seguintes autores: RAMS (2019), SKS (2019), SUHAIL (2019), KARABOGA (2007) e KARABOGA (2009).

3.1. Fluxograma do algoritmo para a alocação da Geração Distribuída.

O algoritmo representado pelo fluxograma da Figura 13 inicializa com a entrada de dados do sistema a ser analisado e inicializa as variáveis auxiliares. Em seguida esses dados são convertidos para base pu , conforme Tabela 3.

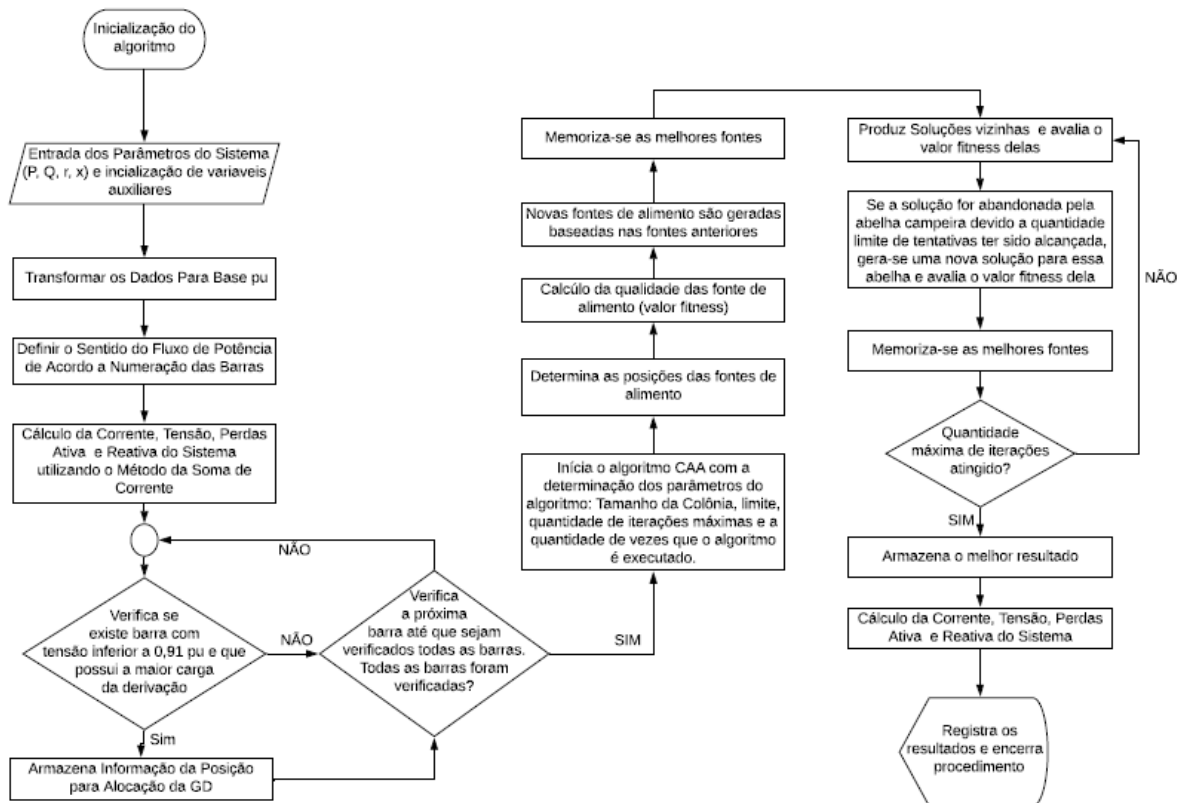
Tabela 3-Valores base para transformar dados em pu .

Tensão de Base $V_{base}(kV)$	Potência de Base $S_{base}(MVA)$	Impedância de base $Z_{base}(\Omega) =$ $\frac{V_{base}^2}{S_{base}}$
12,66	100	1,602756

Fonte: ZIMMERMAN, 2010.

Com esses dados armazenados o algoritmo inicia a próxima etapa que é o cálculo do fluxo de potência utilizando o método da soma de corrente (*backward sweep – forward sweep*). Os dados de corrente, tensão e perdas obtidos no processo são armazenados para posterior análise.

Figura 13-Fluxograma do Algoritmo



Fonte: Própria.

Na próxima etapa o algoritmo realiza uma busca para determinar a quantidade e a localização das GD's no sistema, para isso tem se os seguintes critérios de restrição:

- Uma GD para cada derivação do sistema;
- A barra escolhida deve ser a que apresenta o nível de tensão inferior a $0,91 pu$ e que tenha a maior carga associada.

Para a próxima etapa começa o algoritmo CAA essa meta-heurística possui os seguintes parâmetros de controle:

- Tamanho da Colônia (NP), sendo que metade da colônia é de abelhas empregadas e a outra metade de abelhas observadoras;
- O valor limite (*limit*), consiste na quantidade de tentativas máxima de uma fonte de alimento para abandonar a fonte;
- A quantidade máxima de iterações (*MaxCycle*);
- A quantidade de vezes que o algoritmo CAA será processado (*runtime*).

A partir disso, o algoritmo CAA segue os seguintes passos, conforme fluxograma da Figura 13:

1. Inicializa as posições das fontes de alimento de acordo a quantidade de abelhas empregadas conforme a (29), onde a variável $Food_{ij}$ representa as posições das fontes, ou seja, as possíveis soluções.

$$Food_{ij} = ub_{ij} + \varphi(ub - lb) \quad (29)$$

Onde,

ub – Limite superior da fonte de alimento (Potência Máxima da GD);

lb – Limite inferior da fonte de alimento (Potência Mínima da GD);

φ – Gera valores aleatórios entre $[-1, 1]$;

$i \in \{1, 2, 3, \dots, \frac{NP}{2}\}$;

$j \in \{1, 2, 3, \dots, D\}$;

D – Número de Parâmetros a ser otimizado.

2. Cálculo da qualidade do néctar da população a partir do seu valor fitness, através da equação:

$$fitness_i = \frac{1}{1 + Obj.Fun._i} \quad (30)$$

Obj.Fun. – Representa a resposta da solução i , ou seja, corresponde ao valor da perda ativa do sistema para a solução i analisada, sendo que essa variável está em unidade pu .

3. Produz novas fontes de alimento semelhantes (*NewFood*) as fontes posicionadas anteriormente. Em seguida é avaliado o valor *fitness* da nova fonte.
4. Memoriza a melhor posição da fonte de alimento;
5. Produz soluções vizinhas para as abelhas para as abelhas observadoras e avalia o valor fitness delas;
6. Se a solução for abandonada pela abelha campeira devido a quantidade limite de tentativas ter sido alcançada, gera-se uma nova solução para essa abelha e avalia o valor fitness dela;
7. Memoriza a melhor solução;
8. Se o número máximo de ciclos for atingido para o algoritmo gera-se os resultados e calcula o fluxo de potência. Caso contrário, retorna ao passo 3.

As abelhas empregadas e observadoras selecionam novas fontes de alimento baseado nas fontes geradas no início do processo, dependendo das informações visuais (valor de fitness). A informação visual é baseada na comparação das posições das fontes de alimentos.

Por outro lado, as abelhas campeiras, sem nenhuma orientação enquanto procuram uma posição de fonte de alimento, exploram uma posição completamente nova de fonte de alimento. Portanto, as campeiras são caracterizadas, com base em seu comportamento, por baixos custos de pesquisa e baixa média na qualidade da fonte alimentar. Ocasionalmente, podem descobrir fontes de alimentos ricas e totalmente desconhecidas. (KARABOGA, 2007).

3.2. Parâmetros de Controle de algoritmo CAA

O algoritmo CAA possui 3 parâmetros de controle, sendo eles, o tamanho da colônia (NP), quantidade de iterações ($MaxCycle$) e o limite de tentativas ($limit$). Esses parâmetros são alterados de acordo o desempenho apresentado. Contudo, em (KARABOGA, 2007) é sugerido que o limite ($limit$) seja um número maior ou igual a $0,5xNP$ para otimização de apenas um parâmetro.

Por outro lado, temos o parâmetro $runtime$ que consiste na variável que determina a quantidade de vezes que o algoritmo CAA será processado para o problema analisado, este se assemelha a variável de iterações com a diferença de que a variável $runtime$ além de repetir o as etapas de cada abelha (empregada, escoteira e observadora), produz a cada passo posições de alimento novas que podem ser diferentes das anteriores. Além disso, para cada passo do $runtime$ a melhor resposta é armazenada.

3.3. Restrições do algoritmo CAA para alocação e dimensionamento ótimo.

Para realizar a busca pela alocação e dimensionamento ótimo da GD nos sistemas de distribuição de 33 e 69 barras, foram utilizadas as seguintes restrições:

- $0,91 pu \leq V \leq 1,1 pu$;
- $0,00075 pu \leq S_{GD} \leq 0,05 pu$;
- $\pm 0,92 \leq FP_{GD} \leq 1$;
- $P_{GD_i} = P_{GD_j}, i \neq j, i, j \in \{1, 2, 3, 4, \dots\}$;
- Uma GD por derivação e tronco do alimentador.

Onde,

FP_{GD} - Fator de Potência da GD;

P_{GD_i} -Potência Ativa da GD na derivação i ;

P_{GD_j} - Potência Ativa da GD na derivação j ;

S_{GD} - Potência Aparente da GD;

V –Tensão da barra;

i, j - Derivações do sistema.

Além desses parâmetros, para o algoritmo a função objetivo que se deseja minimizar corresponde as perdas ativas do sistema, ou seja, trata-se da Equação 26.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente foi aplicado o algoritmo de fluxo de potência, apenas, para determinar as perdas do sistema IEEE 33 e IEEE 69 barras sem a presença de GD's e com isso foi possível obter os resultados conforme apresentado na Tabela 4.

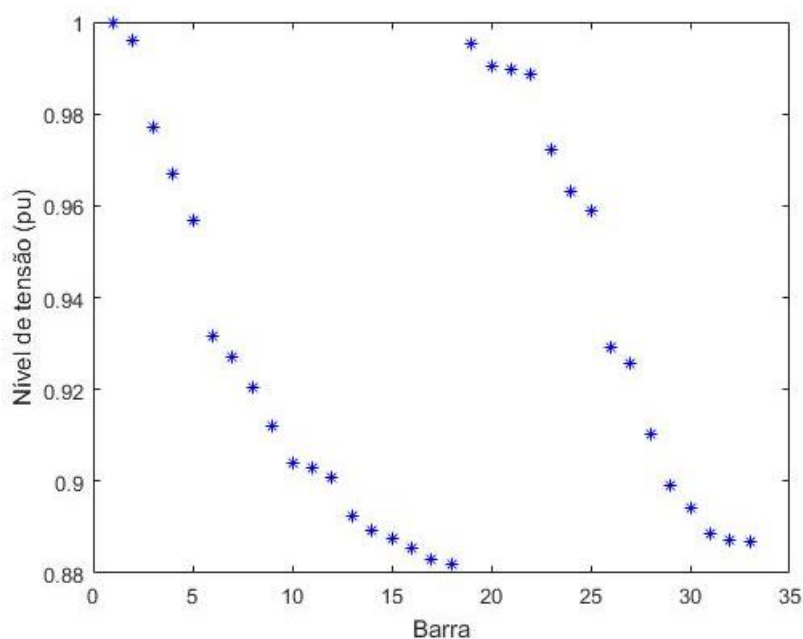
Tabela 4- Perdas dos Sistemas sem GD

	P (kW)	Q (kVAr)	S (kVA)
IEEE 33 barras	280	190	340
IEEE 69 barras	340	150	370

Fonte: Própria.

O sistema apresentava o seguinte perfil de tensão de acordo apresenta a Figura 14.

Figura 14-Perfil de Tensão do IEEE 33 barras sem GD



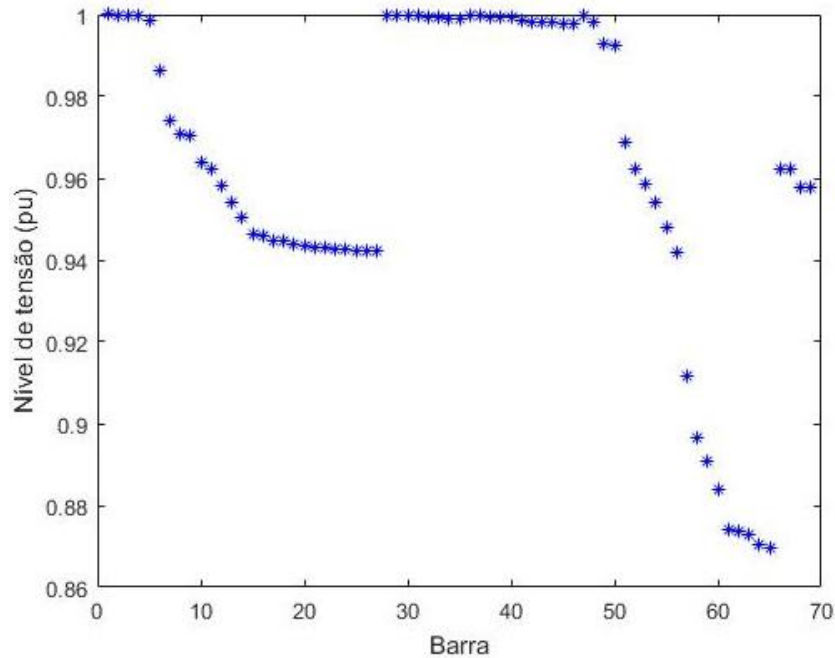
Fonte: Própria.

Com relação ao perfil de tensão apresentado na Figura 14 é perceptível que nas regiões entre as barras 10 até a 15 e 30 até a 33 o nível de tensão está abaixo de $0,91 pu$, com um valor mínimo de $0,882 pu$ na barra 18.

No Figura 15 é notável que na região entre a barra 55 até a barra 65 existem valores abaixo de $0,91 pu$, entretanto as demais barras estão dentro da faixa de tensão adequada aos

indicadores de qualidade de energia. O menor valor de tensão do sistema foi de 0,8697 pu na barra 65.

Figura 15 - Perfil de Tensão do IEEE 69 barras sem GD



Fonte: Própria.

4.1. Localização das GD's

A partir do conhecimento das perdas mostrados na Tabela 4 e do perfil de tensão apresentado nas Figura 14 e Figura 15, referente a cada sistema sem a GD, buscou-se reduzir as perdas com a inserção de GD's no sistema.

Para isso, inicialmente, foi definido a localização por método analítico obedecendo as restrições e em seguida foram realizadas análises de diversos cenários em que a GD possui fator de potência unitário, indutivo e capacitivo.

De acordo com as restrições de alocação da GD's, através do algoritmo implementado obteve-se os resultados da Tabela 5.

4.2. Inserção de GD com Fator de Potência (FP) unitário.

Para este cenário, o algoritmo CAA gerou os resultados da Tabela 6 para o sistema de 33 barras e da Tabela 7 para o sistema de 69 barras.

Tabela 5-Quantidade e Localização das GD's.

	Localização (N^a da barra)	Quantidade Instalada
IEEE 33 barras	14 e 30	2
IEEE 69 barras	61	1

Fonte: Própria.

- IEEE 33 barras:

A partir da Tabela 6 é possível observar que a perda ativa do sistema reduziu em aproximadamente 40,5% das perdas totais com o sistema sem a presença de GD. Isso se deu devido ao fato de no sistema estarem presentes duas GD's nas barras 14 e 30 com índice de penetração (IP) de aproximadamente 27% cada uma.

No perfil de tensão apresentado na Figura 16, pode-se visualizar uma comparação entre o sistema sem e com a inserção da GD, o sistema com GD apresentou uma melhora na qualidade de tensão entregue aos consumidores mais extremos do sistema, com valor mínimo de 0,9593 pu, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6-Sistema 33 barras com GD e FP unitário

NP=60	Iteração=30	Limite=30	<i>runtime</i> = 100
P_{perdas} (kW)		113,365	
Q_{perdas} (kVAr)		77,8172	
<i>Tempo</i> (s)		101	
P_{GD} (kW)		999,3086	
Q_{GD} (kVAr)		0	
S_{GD} (kVA)		999,3086	
V_{min} (pu)		0,9593	
$Localização_{GD}$		14 e 30	

Fonte: Própria.

- IEEE 69 barras

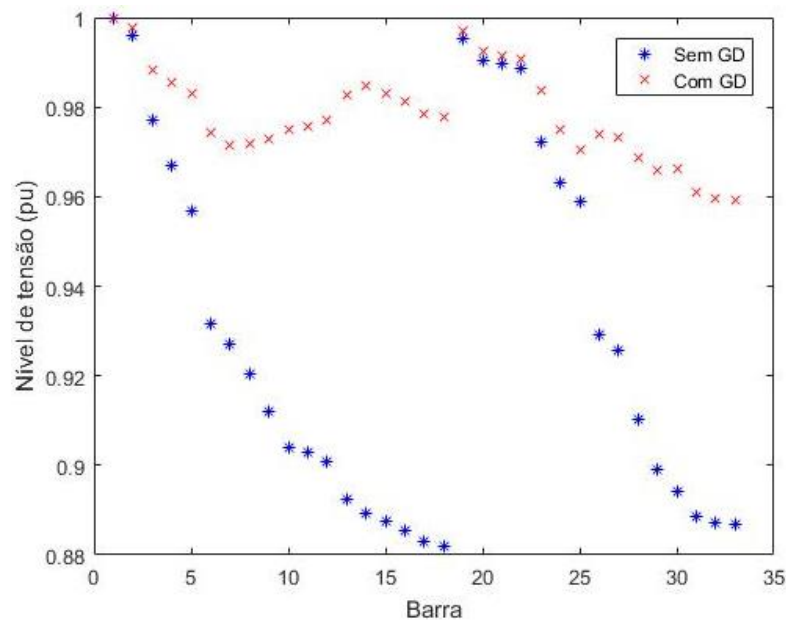
Para a alocação de GD no sistema de 69 barras o algoritmo apresentou os resultados indicados na Tabela 7. Neste sistema, há a presença de apenas um GD localizada na barra 61 que possui um índice de penetração (IP) de aproximadamente 51%. Além disso, o nível de tensão nas barras mais extremas do sistema apresentam valores acima de 0,91 pu, conforme mostra a Figura 17.

Tabela 7-Sistema 69 barras com GD e FP unitário

NP=60	Iteração=30	Limite=30	<i>runtime</i> = 100
P_{perdas} (kW)		113,0515	
Q_{perdas} (kVAr)		54,2681	
Tempo (s)		897	
P_{GD} (kW)		1904,2	
Q_{GD} (kVAr)		0	
S_{GD} (kVA)		1904,2	
V_{min} (pu)		0,9596	
Localização _{GD}		61	

Fonte: Própria

Figura 16-Perfil de tensão do sistema 33 barras com GD de FP unitário



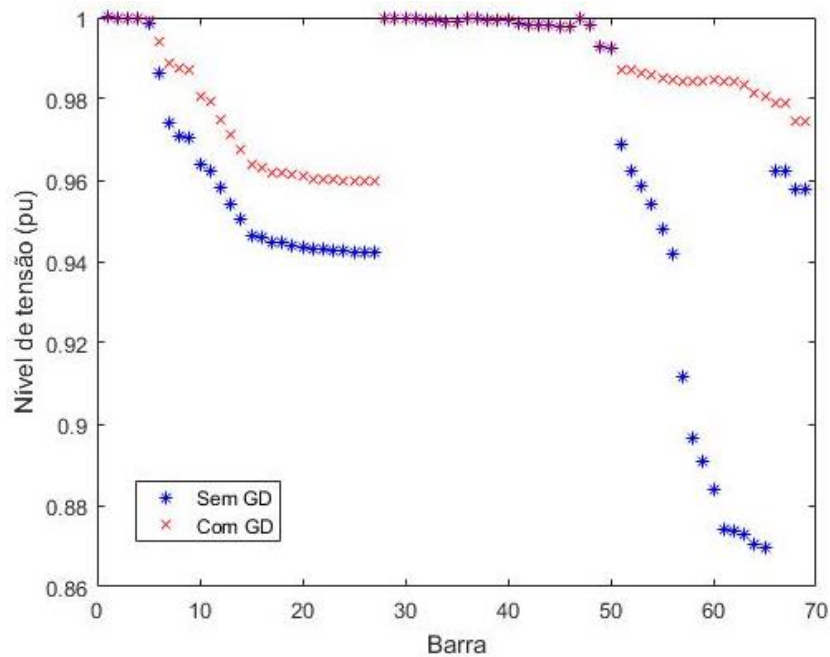
Fonte: Própria.

Em ambos os sistemas, 33 e 69 barras, a inserção da GD no sistema proporcionou a melhora no desempenho, tanto do perfil de tensão, como também das perdas ativas e reativas. Apesar da GD inserida ser de fator unitário e não possuir a inserção de reativo no sistema, a mesma influência na redução dos reativos, pois sua presença tem impacto direto na corrente do sistema e esse por sua vez é a variável principal do cálculo de reativo, conforme Equação (27).

4.3. Inserção de GD com Fator de Potência (FP) indutivo.

No cenário de GD com FP indutivo o algoritmo CAA gerou os resultados descritos na Tabela 8 para o sistema de 33 barras e na Tabela 9 para o sistema de 69 barras.

Figura 17 - Perfil de tensão do sistema 69 barras com GD de FP unitário



Fonte: Própria.

Tabela 8-Sistema 33 barras com GD e FP indutivo

NP=60	Iteração=30	Limite=30	<i>runtime</i> = 100
P_{perdas} (kW)		175,4266	
Q_{perdas} (kVAr)		118,7006	
<i>Tempo</i> (s)		341	
P_{GD} (kW)		764,3827	
Q_{GD} (kVAr)		222,9759	
S_{GD} (kVA)		796,2406	
V_{min} (pu)		0,9356	
<i>Localização</i> _{GD}		14 e 30	

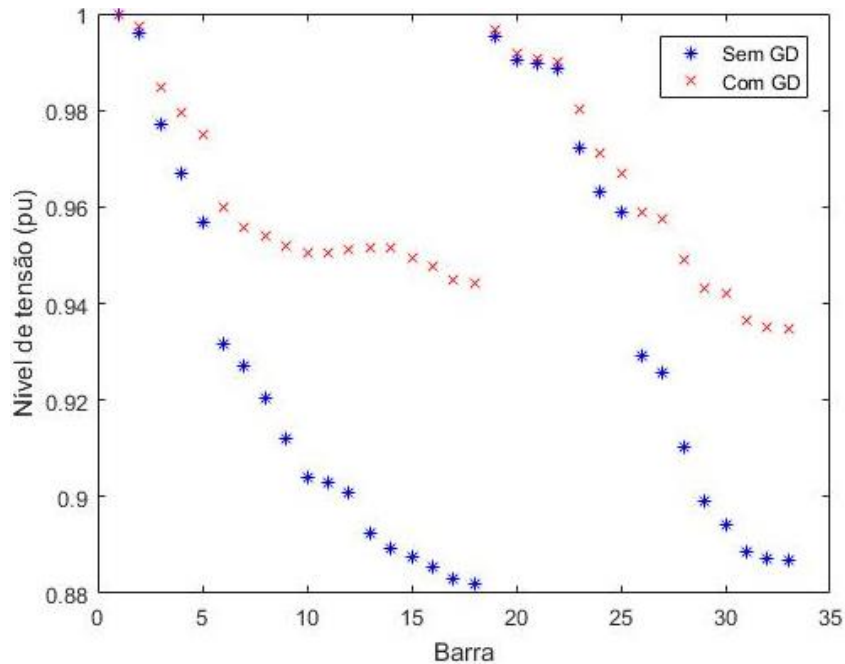
Fonte: Própria.

- IEEE 33 barras

A inserção da GD para esse caso proporcionou a redução das perdas ativas do sistema, entretanto as perdas foram maiores do que com relação a perda obtida para a GD com fator unitário, isso ocorreu pelo fato de a GD com FP indutivo buscar reduzir as perdas do sistema controlando tanto o valor da potência ativa como da potência reativa (indutivo) gerada, enquanto que para a GD com FP unitário apenas a potência ativa é o parâmetro de otimização.

Com relação ao perfil de tensão a Figura 18 mostra que todas as barras apresentaram níveis de tensão dentro da faixa adequada de tensão definida pelos indicadores de qualidade de energia. Contudo, o nível de tensão nas barras mais extremas apresentou valores menores do que com a GD com FP unitário.

Figura 18-Perfil de tensão do sistema de 33 barras com GD e FP indutivo



Fonte: Própria.

- IEEE 69 barras

Para o sistema de 69 barras obteve-se os resultados presente na Tabela 9. Para essa análise a redução das perdas foi de aproximadamente 44% com relação as perdas ativas e de 41,75% com relação as perdas reativas. Na Figura 19 é notável que o novo perfil de tensão apresentou valores adequado aos normativos para as barras mais extremas do sistema, sendo que o menor valor de tensão em *pu* foi de 0,9543.

4.4. Inserção de GD com Fator de Potência (FP) capacitivo.

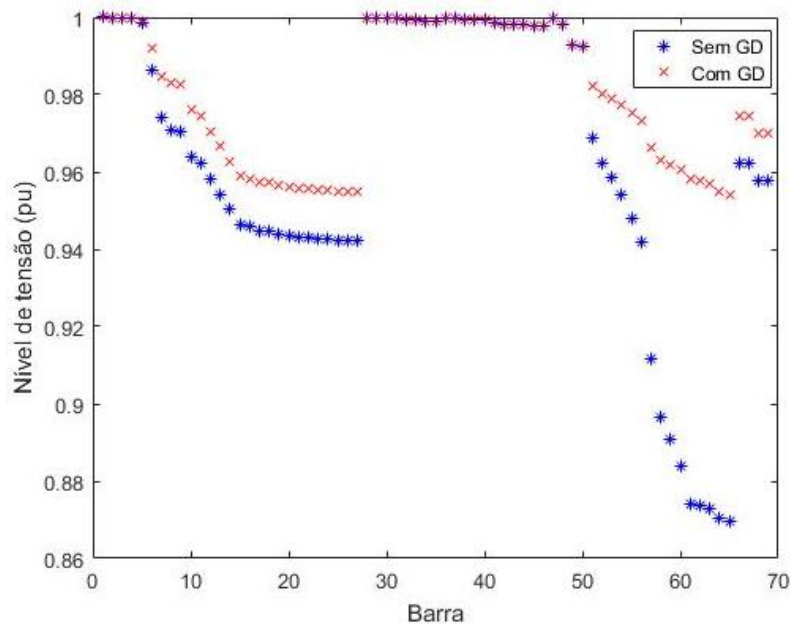
A análise dos sistemas de 33 e 69 barras para a inserção de GD's com FP capacitivo. Os resultados obtidos estão representados na Tabela 10 e Tabela 11.

Tabela 9-Sistema 69 barras com GD e FP indutivo

NP=60	Iteração=30	Limite=30	runtime = 100
P_{perdas} (kW)		190,1350	
Q_{perdas} (kVAr)		87,2533	
Tempo (s)		897	
P_{GD} (kW)		1480,8	
Q_{GD} (kVA)		433,07	
S_{GD} (kVA)		1542,8	
V_{min} (pu)		0,9543	
Localização _{GD}		61	

Fonte: Própria.

Figura 19-Perfil de tensão do sistema 69 barras com GD e FP indutivo



Fonte: Própria.

- IEEE 33 barras

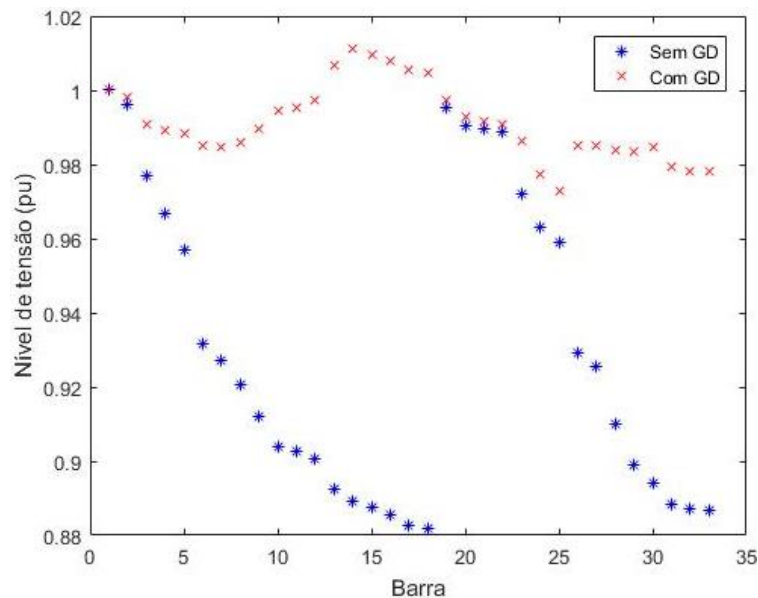
Com relação a inserção de GD com FP capacitivo é notável que as reduções das perdas foram mais significativas dentre todos os cenários de fator de potência. Isso se deu por conta de além da perda ativa está tendo redução no seu valor, assim também acontece com os reativos da rede o que proporciona menores perdas totais para o sistema. Todavia, o sistema deve adequar o dimensionamento da GD para que as restrições de nível de tensão e ampacidade do sistema não sejam violados. O perfil de tensão do sistema está apresentado na Figura 20.

Tabela 10-Sistema 33 barras com GD e FP capacitivo

NP=60	Iteração=30	Limite=30	<i>runtime</i> = 100
P_{perdas} (kW)		56,3839	
Q_{perdas} (kVAr)		40,6431	
T_{empo} (s)		326	
P_{GD} (kW)		1065,8	
Q_{GD} (kVA)		-452,673	
S_{GD} (kVA)		1157,9	
V_{min} (pu)		0,9731	
$Localização_{GD}$		14 e 30	

Fonte: Própria.

Figura 20-Perfil de tensão do sistema 33 barras com GD e FP capacitivo



Fonte: Própria.

Na Figura 20 a maioria das barras estão próximas de 1 pu, sendo que o menor valor foi de 0.9731 pu. Contudo, também houve barras que apresentaram nível de tensão acima de 1, isso mostra que a inserção de reativo capacitivo na rede deve ser de forma controlada para que o sistema não apresente níveis de tensão acima dos níveis aceitáveis.

- IEEE 69 barras

Para o sistema de 69 barras os dados são apresentados na Tabela 11 e o perfil de tensão na Figura 21. Figura 21-Perfil de tensão do sistema 69 barras com GD e FP capacitivo. De forma

semelhante a análise feita anteriormente para o sistema de 33 barras, no sistema de 69 barras a redução das perdas foram de significativas numa taxa de 78% do valor das perdas sem GD.

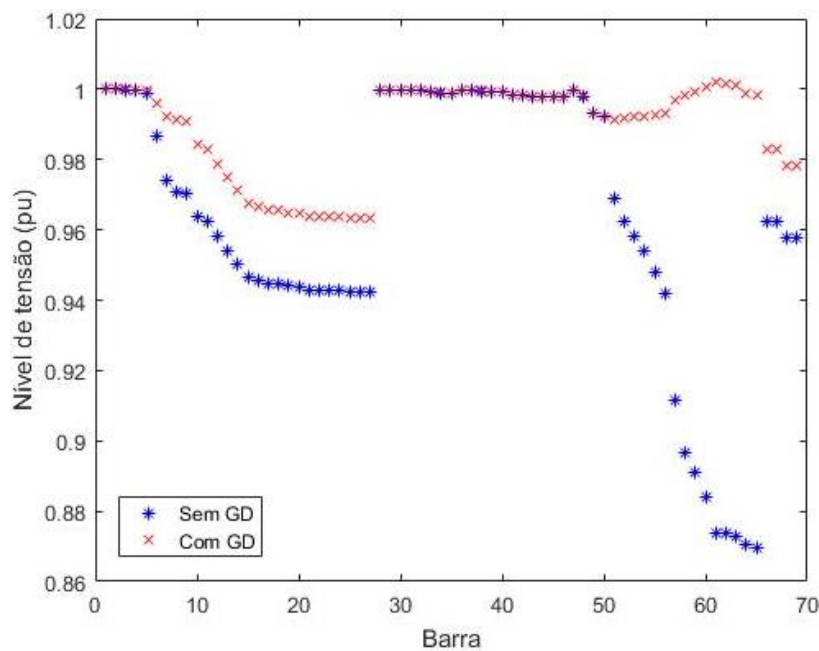
Tabela 11-Sistema 69 barras com GD e FP capacitivo

NP=60	Iteração=30	Limite=30	runtime = 100
P_{perdas} (kW)		42,0246	
Q_{perdas} (kVAr)		23,9283	
Tempo (s)		906	
P_{GD} (kW)		2015,4	
Q_{GD} (kVA)		-857,2493	
S_{GD} (kVA)		2190,1	
V_{min} (pu)		0,9632	
Localização _{GD}		61	

Fonte: Própria.

Além disso, o perfil de tensão apresentou resultados dentro do admissível, sendo que diferente do sistema de 33 barras, no de 69 barras as tensões não aumentaram tanto quanto ocorreu no sistema de 33 barras. Isso se deu por conta de no sistema com 69 barras houve apenas uma inserção de GD e por conta disso os valores de tensão ficaram adequados, conforme mostra Figura 21.

Figura 21-Perfil de tensão do sistema 69 barras com GD e FP capacitivo



Fonte: Própria.

Comparando as três formas de inserção de GD's (FP unitário, indutivo e capacitivo) é possível notar que com relação a GD com FP unitário e indutivo a medida que a carga na barra onde está sendo inserido a GD se aproxima de zero há uma redução significativa nas perdas ativas do sistema, temos também que com relação a GD com FP indutivo existe uma redução nas perdas reativas, entretanto essas são menores do que nos outros cenários analisados.

Contudo, a GD com FP capacitivo foi a que apresentou as menores perdas do sistema, isso pelo fato de a GD realizar a redução dos reativos gerados no sistema. Por outro lado, a inserção de GD com FP capacitivo assemelha a geração a uma inserção de capacitores no sistema no sistema de distribuição.

Após essas análises com relação ao desempenho do sistema, realizou-se outra verificação a respeito do desempenho do algoritmo CAA para os sistemas de 33 e 69 barras e em seguida realizou-se um comparativo com os resultados apresentados em outras literaturas.

4.5. Análise do desempenho do algoritmo CAA.

O algoritmo apresentou uma convergência quando a variável *runtime* ≥ 30 e quando a população estava em $NP \geq 60$, sendo que os parâmetros limite e quantidade de iterações foram sempre fixados como a metade do tamanho da população. Para valores inferiores a 30 o algoritmo oscila no resultado das perdas, sendo que devido as características probabilísticas do algoritmo CAA há resultados que se aproximam do mínimo.

Ao analisar o desempenho do algoritmo CAA com outros métodos utilizados em outros trabalhos e trabalhos e obteve-se os resultados da

Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14.

Analisando o desempenho evidenciado na

Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14 do algoritmo estudado com outros métodos utilizados para alocação e dimensionamento ótimo de GD é notável que o algoritmo CAA proporcionou bons resultados tanto para o sistema de 33 barra quanto para o sistema de 69 barras.

Tabela 12-Comparação dos resultados com outras referências para fator de potência capacitivo.

REFERÊNCIA	SISTEMA IEEE	MÉTODO	REDUÇÃO DAS PERDAS ATIVAS	NUM. BARRA	POTÊNCIA DA GD (MW)	ÍNDICE PENETRAÇÃO (IP)
ABU-MOUTI, 2011	69	CAA	89%	61	2,2	58%
Este Trabalho	33	CAA	79,9%	14	1,065,8	28,7%
				30	1,065,8	28,7%
	69	CAA	87,6%	61	2,015	53,1%

Fonte: Própria.

Tabela 13-Comparação dos resultados com outras referências para fator de potência indutivo.

REFERÊNCIA	SISTEMA IEEEE	MÉTODO	REDUÇÃO DAS PERDAS ATIVAS	NUM. BARRA	POTÊNCIA DA GD (MW)	ÍNDICE PENETRAÇÃO (IP)
NAGABALLI, 2018	33	Método Analítico	69,53%	6	3	81%
		GA-FUZZY	72,7%	6	3,15	85%
		PSO-FUZZY	73%	6	3,04	82%
Este Trabalho	33	CAA	37,3%	30	0,764	20,5%
				14	0,764	20,5%
	69	CAA	55,9%	61	1,479	39%

Fonte: Própria.

Tabela 14-Comparação dos resultados com outras referências para fator de potência unitário.

REFERÊNCIA	SISTEMA IEEEE	MÉTODO	REDUÇÃO DAS PERDAS ATIVAS	NUM. BARRA	POTÊNCIA DA GD (MW)	ÍNDICE PENETRAÇÃO (IP)
MORADI, 2012	33	GA/PSO	51%	32	1,2	32%
				16	0,86	23%
				11	0,925	25%
		GA	49,6%	11	1,5	40%
				29	0,4228	11%
				30	1,0714	29%
		PSO	50,01%	13	0,9816	26%
				32	0,8297	22%
				8	1,1768	32%
	69	GA/PSO	64%	63	0,8849	23%
				61	1,1926	31%
				21	0,9105	24%
		GA	60%	21	0,9297	24%
				62	1,0752	28%
				64	0,9848	26%
PSO	62,48%	61	1,1998	32%		
		63	0,7956	21%		
		17	0,9925	26%		
KUMARAPPAN, 2016	33	CSO	58,70%	13	0,85	23%
				30	1,16	31%
		CSO	64,59%	13	0,8	22%
				24	1,09	29%
				30	1,05	28%
Este Trabalho	33	CAA	59,5%	14	0,999	26,9%
				30	0,999	26,9%
	69	CAA	66,7%	61	1,904	50,2%

Fonte: Própria.

Analisando para a GD com FP unitário é possível perceber que dentre os métodos que analisou para este cenário, o algoritmo CAA apresentou a maior redução para um menor IP,

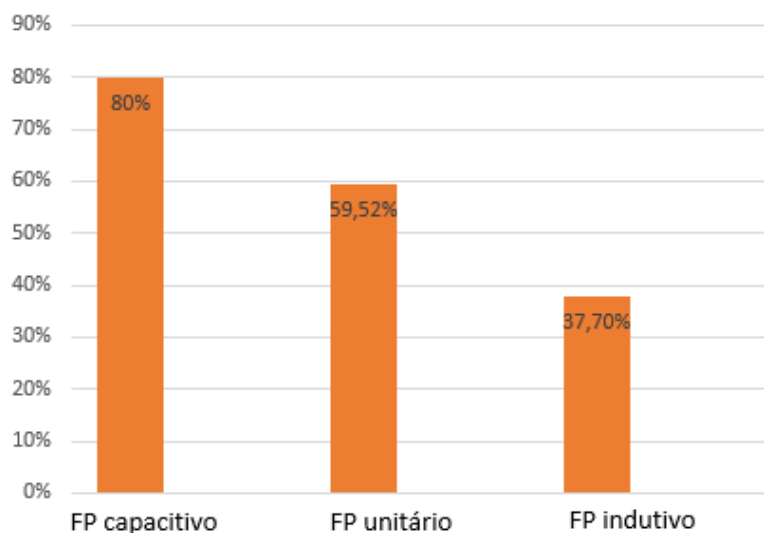
apesar dos demais métodos alocarem mais GD's no sistema e para alguns alocar até mesmo na barra 61, por exemplo, como no algoritmo CAA maior quantidade de potência gerada foi utilizado na barra de localização ótima, por conta disso, as reduções das perdas foram maiores do que alocar várias GD's em posições diferentes.

Por outro lado, para a alocação GD no sistema de 33 barras com FP atrasado é possível notar que o algoritmo CAA obteve a menor redução das perdas, isso se deu por conta de no sistema a barra de localização ótima é a barra 6, entretanto para os critérios de restrição utilizados neste trabalho a barra 6 não se enquadrava como uma possível localização da GD.

Além disso, para a alocação de GD com FP, utilizamos um IP de 20,32%, enquanto que (NAGABALLI, 2018) utilizou um IP acima de 80%. Em relação ao trabalho de (ABU-MOUTI, 2011) a principal diferença entre os métodos é que neste trabalho os valores de fator de potência são gerados de forma aleatória de forma semelhante as posições de fontes de alimento gerando assim cenários de características diversas, como também, as restrições adotadas são diferentes para cada trabalho, uma vez que para este trabalho é considerado as dimensões da GD de acordo as normas reguladoras do Brasil, ou seja, ANEEL.

Contudo, a redução das perdas do sistema está apresentado na Tabela 15 e Tabela 16.

Tabela 15-Redução das Perdas do sistema de 33 barras

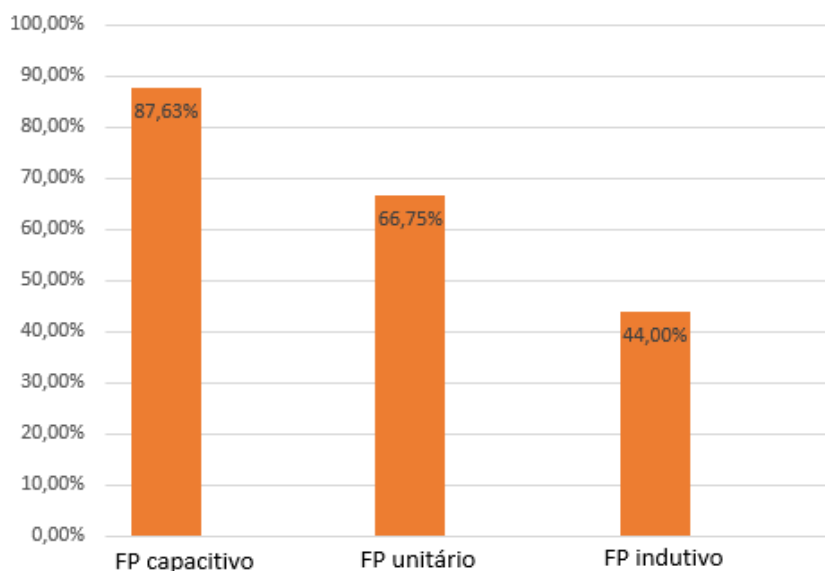


Fonte: Própria.

Esses resultados mostram que o algoritmo apresentou um bom desempenho com relação a redução das perdas do sistema e que o capacitivo proporcionou as maiores reduções,

entretanto é necessário que haja uma limitação em seu dimensionamento para que a inserção da GD satisfaça as restrições do sistema

Tabela 16-Redução das perdas para o sistema de 69 barras



Fonte: Própria.

5. CONCLUSÃO

5.1. Considerações Finais

Ao longo dos últimos anos a utilização da GD's no sistema elétrico de distribuição tem alcançado um progresso significativo. No Brasil, os incentivos governamentais para o uso de energias renováveis têm impulsionado a conexão de GD's na rede. Além disso, a redução das perdas e o fornecimento de energia dentro da faixa de qualidade para o nível de tensão e o fator de potência, mostra-se relevante o estudo.

Todavia, a análise da inserção ótima de GD's viabiliza a utilização de métodos meta-heurísticos na resolução do problema com baixo tempo de processamento e resultados precisos.

Em vista disso, neste trabalho, considerando as premissas ditas anteriormente, desenvolveram-se, a análise da alocação e dimensionamento ótimo de geração distribuída no sistema de distribuição radial utilizando o algoritmo Colônia Artificial de Abelhas. O ponto de minimização das perdas, a melhoria do perfil de tensão do sistema de 33 e 69 barras, bem como o desempenho do algoritmo na solução do problema foram avaliados.

No primeiro momento, foram verificados os perfis de tensão das barras da rede, de acordo com a solução proposta pelo algoritmo CAA para os cenários de inserção de GD com FP indutivo, capacitivo e unitário. Percebeu-se que, em todos os cenários houve redução das perdas ativas e reativas do sistema, como também melhoria no perfil de tensão e que dentre os três cenários, a inserção GD com FP capacitivo foi a que apresentou os melhores resultados.

No segundo momento, foram realizadas simulações variando os parâmetros de controle do algoritmo CAA, com intuito de avaliar o desempenho do algoritmo na busca pela solução ótima. Foram considerados os cenários em que variávamos o tamanho da colônia, a quantidade de iterações e o limite de tentativas de forma diferente para cada sistema analisado. Observou-se que para cada análise de sistema os parâmetros apresentaram comportamentos distintos e que para buscarmos a resposta ótima devemos ajusta-los de forma obter as menores perdas de energia com menor tempo de processamento.

Finalmente, comparamos a resposta do algoritmo CAA com outros métodos heurísticos utilizados para alocação e dimensionamento ótimo de GD nos sistemas radial de distribuição de 33 e 69 barras. Foi perceptível que os resultados foram satisfatórios em comparação aos demais métodos e que a inserção de GD no sistema proporcionou reduções significativas nas perdas de energia dos sistemas de 33 e 69 barras.

5.2. Trabalhos Futuros

- Análise de alocação e dimensionamento ótimo da GD utilizando algoritmo CAA e inteligência artificial;
- Alocação ótima de GD, capacitor e regular de tensão analisando, perfil de tensão, perdas, frequência de operação;
- Análise da proteção do sistema com a presença de GD's no sistema.

6. REFERÊNCIAS

- ABU-MOUTI, F. S.; EL-HAWARY, M. E. **Modified artificial bee colony algorithm for optimal distributed generation sizing and allocation in distribution systems**. In: 2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC). IEEE, 2009. p. 1-9.
- ABU-MOUTI, Fahad S.; EL-HAWARY, M. E. **Optimal distributed generation allocation and sizing in distribution systems via artificial bee colony algorithm**. IEEE transactions on power delivery, v. 26, n. 4, p. 2090-2101, 2011.
- ALHAMALI, Abdulwahab et al. **Determination of optimal site and capacity of DG systems in distribution network based on genetic algorithm**. In: 2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC). IEEE, 2017. p. 1-6.
- ANEEL, Cadernos Temáticos. **Micro e Minigeração Distribuída**. Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Brasília, DF, Brasil: Centro de Documentação–Cedoc, 2014.
- BAHAMISH, Hesham Awadh Abdallah; ABDULLAH, Rosni; SALAM, Rosalina Abdul. **Protein conformational search using bees algorithm**. In: 2008 Second Asia International Conference on Modelling & Simulation (AMS). IEEE, 2008. p. 911-916.
- BLACKBURN, J. Lewis; DOMIN, Thomas J. **Protective relaying: principles and applications**. CRC press, 2014.
- BROWN, Richard E. **Electric power distribution reliability**. CRC press, 2008.
- CAMPO, Sergio Daniel Martinez. **Alocação de dispositivos de proteção e manobras para otimização da confiabilidade de sistemas elétricos de distribuição de energia com restrições de restabelecimento**. 2014.
- CANOSSA, Jâine Henrique. **Um programa interativo para estudos de fluxo de potencia**. 2007.
- CHIRADEJA, P. **Benefit of distributed generation: A line loss reduction analysis**. In: 2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific. IEEE, 2005. p. 1-5.
- DANG, Ke et al. **Benefit of distributed generation on line loss reduction**. In: 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering. IEEE, 2011. p. 2042-2045.
- DAS, J. C. **Load flow optimization and optimal power flow**. CRC Press, 2017.
- DUARTE, Grasielle Regina, et al. **Um algoritmo inspirado em colônias de abelhas para otimização numérica com restrições**. 2015.
- CSANYI, E. **4 Main Types Of Distribution Feeder Systems To Recognize**. EEP. 2016. Disponível em: <https://electrical-engineering-portal.com/4-main-types-distribution-feeder-systems>. Acessado em 25 de janeiro de 2020.
- FALCÃO, D. M. **Fluxo de Potência em Redes de Distribuição Radiais**. COPPE-UFRJ: [sn], 2003.

GERS, Juan M.; HOLMES, Edward J. **Protection of electricity distribution networks**. IET, 2005.

GONTIJO, Rafael M. P. **Alocação de geradores distribuídos orientada por fluxo de potência probabilístico**. UFOP, 2017

GRAHAM W. Ault; JAMES R. McDonald, “**Planning for distributed generation within distribution networks in restructured electricity markets**”, IEEE Power Engineering Review, pp. 52-54, Feb 2000.

HEWITSON, Leslie; BROWN, Mark; BALAKRISHNAN, Ramesh. **Practical power system protection**. Elsevier, 2004.

HIDAYAT, Mohammad Noor; LI, Furong. **Impact of distributed generation technologies on generation curtailment**. In: 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2013. p. 1-5.

INEE. INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **Notas sobre geração Distribuída**. Disponível em: <http://www.inee.org.br/downloads/forum/Notas%20sobre%20GD.pdf>. Acesso em: 22 out 2019

JEGADEESAN, M.; KEERTHANA, V. **Optimal sizing and placement of Distributed Generation in radial distribution feeder using analytical approach**. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, v. 3, n. 3, 2014.

KARABOGA D. “**A new design method based on artificial bee colony algorithm for digital IIR filters**,” J. Franklin Inst., vol. 346, no. 4, pp. 328–348, 2009.

KARABOGA D. BASTURK B. “**A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (CAA) algorithm**,” J. Global Optimiz., vol. 39, pp. 459–471, 2007.

KARABOGA D. BASTURK B. **Artificial Bee Colony (CAA) Optimization Algorithm for Solving Constrained Optimization Problems**. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2007, vol. LNAI 4529, pp. 789–798.

KERSTING, William H. **Distribution system modeling and analysis**. CRC press, 2006.

KUMARAPPAN, Narayanan; ARULRAJ, R. **Optimal installation of multiple DG units using competitive swarm optimizer (CSO) algorithm**. In: 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). IEEE, 2016. p. 3955-3960.

MOHANDAS, N.; BALAMURUGAN, R.; LAKSHMINARASIMMAN, L. **Optimal location and sizing of real power DG units to improve the voltage stability in the distribution system using CAA algorithm united with chaos**. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 66, p. 41-52, 2015.

MONTICELLI, Alcir José. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. E. Blucher, 1983.

NAGABALLI, Srinivas; BHOSALE, Rohit R.; KALE, V. S. **A Hybrid Fuzzy and PSO based Optimum Placement and Sizing of DG in Radial Distribution System**. In: 2018 International Conference on Smart Electric Drives and Power System (ICSEDPS). IEEE, 2018. p. 272-275.

PRODIST, ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica-Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 2– Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição**. 2018.

PRODIST, ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica-Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8– Qualidade da Energia Elétrica**. 2018.

QUANTA. **Setor Elétrico**. Quanta Geração SA. Disponível em: <http://www.quantageracao.com.br/>. 2019. Acessado em 11 de novembro de 2019.

SALLAM, Abdelhay A.; MALIK, Om P. **Electric distribution systems**. John Wiley & Sons, 2018.

SERAPIÃO, A. B. D. S. (2009). **Fundamentos de otimização por inteligência de enxames: uma visão geral**. Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática, 20(3), 271-304.

SHAHNIA, Farhad; AREFI, Ali; LEDWICH, Gerard (Ed.). **Electric distribution network planning**. Singapore: Springer, 2018.

SKS, Labs. **Single Objective Artificial Bee Colony Optimization**. MATLAB Central File Exchange. Disponível em: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/65794-single-objective-artificial-bee-colony-optimization>. Acessado em 20 de novembro de 2019.

SRINIVAS, M. S. **Distribution load flows: a brief review**. In: 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37077). IEEE, 2000. p. 942-945.

SUHAIL. **load flow of radial distribution system**. MATLAB Central File Exchange. Disponível em: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/40376-load-flow-of-radial-distribution-system>. Acessado em 20 de novembro de 2019.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica**. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

WAZIR, Arif; ARBAB, Naeem. **Analysis and optimization of IEEE 33 bus radial distributed system using optimization algorithm**. JETA(E) J. Emerg. Trends Appl. Eng, v. 1, n. 2, p. 2518-4059, 2016.

ZIMMERMAN, Ray Daniel; MURILLO-SÁNCHEZ, Carlos Edmundo; THOMAS, Robert John. **MATPOWER: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education**. IEEE Transactions on power systems, v. 26, n. 1, p. 12-19, 2010.

ANEXO A- Dados do Sistema IEEE 33 barras

Tabela 17- Dados de resistência e reatância do sistema IEEE de 33 barras

S_{base} (MVA)	V_{base} (kV)	Z_{base} (Ω)	<i>Resistência e Reatância</i> (Ω)		<i>Resistência e Reatância</i> (pu)	
100	12,66	1,602756				
	De	Para	R (Ω)	X (Ω)	R (pu)	X (pu)
	1	2	0,0922	0,0470	0,0575	0,0293
	2	3	0,4930	0,2511	0,3076	0,1567
	3	4	0,3660	0,1864	0,2284	0,1163
	4	5	0,3811	0,1941	0,2378	0,1211
	5	6	0,8190	0,7070	0,5110	0,4411
	6	7	0,1872	0,6188	0,1168	0,3861
	7	8	0,7114	0,2351	0,4439	0,1467
	8	9	1,0300	0,7400	0,6426	0,4617
	9	10	1,0440	0,7400	0,6514	0,4617
	10	11	0,1966	0,0650	0,1227	0,0406
	11	12	0,3744	0,1298	0,2336	0,0810
	12	13	1,4680	1,1550	0,9159	0,7206
	13	14	0,5416	0,7129	0,3379	0,4448
	14	15	0,5910	0,5260	0,3687	0,3282
	15	16	0,7463	0,5450	0,4656	0,3400
	16	17	1,2890	1,7210	0,8042	1,0738
	17	18	0,7320	0,5740	0,4567	0,3581
	2	19	0,1640	0,1565	0,1023	0,0976
	19	20	1,5042	1,3554	0,9385	0,8457
	20	21	0,4095	0,4784	0,2555	0,2985
	21	22	0,7089	0,9373	0,4423	0,5848
	3	23	0,4512	0,3083	0,2815	0,1924
	23	24	0,8980	0,7091	0,5603	0,4424
	24	25	0,8960	0,7011	0,5590	0,4374
	6	26	0,2030	0,1034	0,1267	0,0645
	26	27	0,2842	0,1447	0,1773	0,0903
	27	28	1,0590	0,9337	0,6607	0,5826
	28	29	0,8042	0,7006	0,5018	0,4371
	29	30	0,5075	0,2585	0,3166	0,1613
	30	31	0,9744	0,9630	0,6080	0,6008
	31	32	0,3105	0,3619	0,1937	0,2258
	32	33	0,3410	0,5302	0,2128	0,3308

Tabela 18-Dados de Carga do Sistema IEEE de 33 barras

Número da barra	Carga Nominal	
	<i>P (kW)</i>	<i>Q (kVAR)</i>
1	0	0
2	100	60
3	90	40
4	120	80
5	60	30
6	60	20
7	200	100
8	200	100
9	60	20
10	60	20
11	45	30
12	60	35
13	60	35
14	120	80
15	60	10
16	60	20
17	60	20
18	90	40
19	90	40
20	90	40
21	90	40
22	90	40
23	90	50
24	420	200
25	420	200
26	60	25
27	60	25
28	60	20
29	120	70
30	200	600
31	150	70
32	210	100
33	60	40

ANEXO B – Dados do Sistema IEEE 69 barras

Tabela 19-Dados de resistência e reatância do sistema IEEE de 69 barras

S_{base} (MVA)	V_{base} (kV)	Z_{base} (ohms)	<i>Resistência e Reatância</i> (Ω)		<i>Resistência e Reatância</i> (pu)	
100	12,66	1,602756				
Número da barra	De	Para	R (Ω)	X (Ω)	R (Ω)	X (Ω)
	1	2	0,0005	0,0012	0,0003	0,0007
	2	3	0,0005	0,0012	0,0003	0,0007
	3	4	0,0015	0,0036	0,0009	0,0022
	4	5	0,0251	0,0294	0,0157	0,0183
	5	6	0,3660	0,1864	0,2284	0,1163
	6	7	0,3811	0,1941	0,2378	0,1211
	7	8	0,0922	0,0470	0,0575	0,0293
	8	9	0,0493	0,0251	0,0308	0,0157
	9	10	0,8190	0,2707	0,5110	0,1689
	10	11	0,1872	0,0619	0,1168	0,0386
	11	12	0,7114	0,2351	0,4439	0,1467
	12	13	1,0300	0,3400	0,6426	0,2121
	13	14	1,0440	0,3450	0,6514	0,2153
	14	15	1,0580	0,3496	0,6601	0,2181
	15	16	0,1966	0,0650	0,1227	0,0406
	16	17	0,3744	0,1238	0,2336	0,0772
	17	18	0,0047	0,0016	0,0029	0,0010
	18	19	0,3276	0,1083	0,2044	0,0676
	19	20	0,2106	0,0690	0,1314	0,0431
	20	21	0,3416	0,1129	0,2131	0,0704
	21	22	0,0140	0,0046	0,0087	0,0029
	22	23	0,1591	0,0526	0,0993	0,0328
	23	24	0,3463	0,1145	0,2161	0,0714
	24	25	0,7488	0,2475	0,4672	0,1544
	25	26	0,3089	0,1021	0,1927	0,0637
	26	27	0,1732	0,0572	0,1081	0,0357
	3	28	0,0044	0,0108	0,0027	0,0067
	28	29	0,0640	0,1565	0,0399	0,0976
	29	30	0,3978	0,1315	0,2482	0,0820
	30	31	0,0702	0,0232	0,0438	0,0145
	31	32	0,3510	0,1160	0,2190	0,0724
	32	33	0,8390	0,2816	0,5235	0,1757

33	34	1,7080	0,5646	1,0657	0,3523
34	35	1,4740	0,4873	0,9197	0,3040
3	36	0,0044	0,0108	0,0027	0,0067
36	37	0,0640	0,1565	0,0399	0,0976
37	38	0,1053	0,1230	0,0657	0,0767
38	39	0,0304	0,0355	0,0190	0,0221
39	40	0,0018	0,0021	0,0011	0,0013
40	41	0,7283	0,8509	0,4544	0,5309
41	42	0,3100	0,3623	0,1934	0,2260
42	43	0,0410	0,0478	0,0256	0,0298
43	44	0,0092	0,0116	0,0057	0,0072
44	45	0,1089	0,1373	0,0679	0,0857
45	46	0,0009	0,0012	0,0006	0,0007
4	47	0,0034	0,0084	0,0021	0,0052
47	48	0,0851	0,2083	0,0531	0,1300
48	49	0,2898	0,7091	0,1808	0,4424
49	50	0,0822	0,2011	0,0513	0,1255
8	51	0,0928	0,0473	0,0579	0,0295
51	52	0,3319	0,1114	0,2071	0,0695
52	53	0,1740	0,0886	0,1086	0,0553
53	54	0,2030	0,1034	0,1267	0,0645
54	55	0,2842	0,1447	0,1773	0,0903
55	56	0,2813	0,1433	0,1755	0,0894
56	57	1,5900	0,5337	0,9920	0,3330
57	58	0,7837	0,2630	0,4890	0,1641
58	59	0,3042	0,1006	0,1898	0,0628
59	60	0,3861	0,1172	0,2409	0,0731
60	61	0,5075	0,2585	0,3166	0,1613
61	62	0,0974	0,0496	0,0608	0,0309
62	63	0,1450	0,0738	0,0905	0,0460
63	64	0,7105	0,3619	0,4433	0,2258
64	65	1,0410	0,5302	0,6495	0,3308
11	66	0,2012	0,0611	0,1255	0,0381
66	67	0,0047	0,0014	0,0029	0,0009
12	68	0,7394	0,2444	0,4613	0,1525
68	69	0,0047	0,0016	0,0029	0,0010

Tabela 20- Dados de Carga do Sistema IEEE de 69 barras

Número da barra	Carga nominal	
	<i>P (kW)</i>	<i>Q (kVAR)</i>
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	2,6	2,2
7	40,4	30
8	75	54
9	30	22
10	28	19
11	145	104
12	145	104
13	8	5
14	8	5,5
15	0	0
16	45,5	30
17	60	35
18	60	35
19	0	0
20	1	0,6
21	114	81
22	5	3,5
23	0	0
24	28	20
25	0	0
26	14	10
27	14	10
28	26	18,6
29	26	18,6
30	0	0
31	0	0
32	0	0
33	14	10
34	9,5	14
35	6	4
36	26	18,55
37	26	18,55

38	0	0
39	24	17
40	24	17
41	1,2	1
42	0	0
43	6	4,3
44	0	0
45	39,22	26,3
46	39,22	26,3
47	0	0
48	79	56,4
49	384,7	274,5
50	384,7	274,5
51	40,5	28,3
52	3,6	2,7
53	4,35	3,5
54	26,4	19
55	24	17,2
56	0	0
57	0	0
58	0	0
59	100	72
60	0	0
61	1244	888
62	32	23
63	0	0
64	227	162
65	59	42
66	18	13
67	18	13
68	28	20
69	28	20

APÊNDICE A– Algoritmo de otimização utilizado

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%MAIN CODE%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%INICIO CODIGO%

clc;
clear all;
format short;
m=load('loaddata33bus.m');
l=load('linedata33bus.m');
m=load('loaddata69bus.m');
l=load('linedata69bus.m');

br=length(l);
no=length(m);
MVA=100;
KV=11;
Zb=(KV^2)/MVA;

%Criar GD e Localização
GD_tam=zeros(no,3);
GD_loc=zeros(no,1);

%Dados em pu
for i=1:br
    R(i,1)=(l(i,4))/Zb;
    X(i,1)=(l(i,5))/Zb;
end
for i=1:no
    P(i,1)=(m(i,2))/(1000*MVA);
    Q(i,1)=(m(i,3))/(1000*MVA);
end
R;
X;
P;
Q;
C=zeros(br,no);%Matriz de zeros na dimensão 32x33
for i=1:br%Nesse laço é definido em quais barras estão conectadas
    a=l(i,2);%Posição inicial da barra
    b=l(i,3);%Posição final da barra
    for j=1:no
        if a==j
            C(i,j)=-1;
        end
        if b==j
            C(i,j)=1;
        end
    end
end
C;
e=1;
for i=1:no%Nesse Laço é definido quais são as barras de fim de linha
    d=0;
    for j=1:br
        if C(j,i)==-1
            d=1;
        end
    end
end
```

```

        if d==0
            endnode(e,1)=i;
            e=e+1;
        end
    end
endnode;
h=length(endnode);%Contabiliza a quantidade de barras de fim de linha
for j=1:h
    e=2;
    f=endnode(j,1);
    % while (f~=1)
    for s=1:no%Nesse laço coloca em sequência as barras de acordo a
topologia da rede e armazena na matriz g
        if (f~=1)
            k=1;
            for i=1:br
                if ((C(i,f)==1) && (k==1))
                    f=i;
                    k=2;
                end
            end
            k=1;
            for i=1:no
                if ((C(f,i)==-1) && (k==1));
                    f=i;
                    g(j,e)=i;
                    e=e+1;
                    k=3;
                end
            end
        end
    end
end
end
for i=1:h%Nesse laço completa a matriz g com as posições finais do sistema
que estavam na matriz endnode
    g(i,1)=endnode(i,1);
end
g;
w=length(g(1,:));%Mede o tamanho da linha na matriz g
for i=1:h%Coloca em ordem crescente em cada linha a posição das barras
    j=1;
    for k=1:no
        for t=1:w
            if g(i,t)==k
                g(i,t)=g(i,j);
                g(i,j)=k;
                j=j+1;
            end
        end
    end
end
end
g;
for k=1:br%A matriz adjb é responsável por organizar quais as barras que
estão a montante da barra sinalizada
    e=1;
    for i=1:h
        for j=1:w-1
            if (g(i,j)==k)
                if g(i,j+1)~=0
                    adjb(k,e)=g(i,j+1);
                    e=e+1;
                end
            end
        end
    end
end

```

```

                else
                    adjb(k,1)=0;
                end
            end
        end
    end
end
adjb;
for i=1:br-1
    for j=h:-1:1
        for k=j:-1:2
            if adjb(i,j)==adjb(i,k-1)
                adjb(i,j)=0;
            end
        end
    end
end
adjb;
x=length(adjb(:,1));
ab=length(adjb(1,:));
for i=1:x
    for j=1:ab
        if adjb(i,j)==0 && j~=ab
            if adjb(i,j+1)~=0
                adjb(i,j)=adjb(i,j+1);
                adjb(i,j+1)=0;
            end
        end
        if adjb(i,j)~=0
            adjb(i,j)=adjb(i,j)-1;
        end
    end
end
adjb;
for i=1:x-1
    for j=1:ab
        adjcb(i,j)=adjb(i+1,j); %Finalmente organiza a numeração das barras
na primeira coluna da matriz e indica com zero na primeira coluna as barras
extremas e na segunda coluna a numeração sequencial dessas extremidades.
    end
end
b=length(adjcb);

%Inicializa o vetor de tensão com todas as barras em lpu

for i=1:no
    vb(i,1)=1;
end

cont=0;

fluxdepot
PosicaoDaGD
bee

%FIM CODIGO%

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%FLUXDEPOT%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%I
NICIO CODIGO%
for s=1:10
    for i=1:no%Calcula o vetor de corrente complexa
        nlc(i,1)=conj(complex(P(i,1),Q(i,1)))/(vb(i,1));
    end
    nlc;
    for i=1:br%Ajusta a posição das correntes no vetor
        Ibr(i,1)=nlc(i+1,1);
    end
    Ibr;
    xy=length(adjcb(1,:));
    for i=br-1:-1:1%Esse laço realiza a soma da contribuição de corrente de
cada barra vizinha. Ou seja, aplica a etapa direta do método de soma de
corrente.
        for k=1:xy
            if adjcb(i,k)~=0
                u=adjcb(i,k);
                %Ibr(i,1)=nlc(i+1,1)+Ibr(k,1);
                Ibr(i,1)=Ibr(i,1)+Ibr(u,1);
            end
        end
    end
    Ibr;
    for i=2:no%Para esse laço é realizado a etapa reversa do método de soma
de corrente.
        g=0;
        for a=1:b
            if xy>1
                if adjcb(a,2)==i-1
                    u=adjcb(a,1);
                    vb(i,1)=((vb(u,1))-((Ibr(i-1,1))*complex((R(i-
1,1)),X(i-1,1)))));
                    g=1;
                end
                if adjcb(a,3)==i-1
                    u=adjcb(a,1);
                    vb(i,1)=((vb(u,1))-((Ibr(i-1,1))*complex((R(i-
1,1)),X(i-1,1)))));
                    g=1;
                end
            end
        end
        if g==0
            vb(i,1)=((vb(i-1,1))-((Ibr(i-1,1))*complex((R(i-1,1)),X(i-
1,1)))));
        end
    end
    s=s+1;
end
nlc;
Ibr;
vb;
vbp=[abs(vb) angle(vb)*180/pi];

Ibrp=[abs(Ibr) angle(Ibr)*180/pi];
PL(1,1)=0;
QL(1,1)=0;

```

```

% Determinação das perdas ativas e reativas do sistema
for f=1:br
    Pl(f,1)=(Ibrp(f,1)^2)*R(f,1);
    Ql(f,1)=X(f,1)*(Ibrp(f,1)^2);
    PL(1,1)=PL(1,1)+Pl(f,1);
    QL(1,1)=QL(1,1)+Ql(f,1);
end

%Armazenar os dados
if(cont==0)
    P_anterior=P;
    Q_anterior=Q;
    vb_anterior=vb;
end
cont=1;

%FIM CODIGO%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%POSIÇÃO DAGD%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%INICIO CODIGO%
LC=1;
MaxPot=0;
for jjj=1:1:no-2
    if (adjcb(jjj,1)~=0)
        if (vbp(adjcb(jjj,1),1)<0.91 && P(jjj,1)>0.00075)
            if(P(jjj,1)>MaxPot)
                local(LC,1)=adjcb(jjj,1);
            end
            MaxPot=P(jjj,1);
        end
    end
    if (adjcb(jjj,1)==0)
        LC=LC+1;
        local(LC,1)=0;
    end
end
s=1;
for jjj=1:LC
    if(local(jjj,1)~=0)
        pos(s,1)=local(jjj,1)-1;
        s=s+1;
    end
end

%FIM CODIGO%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%BEE%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%INICIO CODIGO%

%Parâmetros de controle do algoritmo das abelhas
NP=60; %Tamanho da colônia (Abelha Campeira + Abelha Observadora)
FoodNumber=NP/2; %O número de fontes de alimento é igual a metade do
tamanho da colônia

```

```

limit=30; %Limite de tentativa para uma mesma fonte de comida que não pode
ser melhorada
maxCycle=30; %Número Máximo de Iterações. Critério de Parada

%Especificações das variáveis do problema
objfun=complex(PL,QL); %função a ser otimizada
D=1; %Quantidade de parâmetros do problema para ser otimizado
ub=ones(1,D)*0.05; %limite superior dos parâmetros.
lb=ones(1,D)*(0.00075);%limite inferior dos parâmetros.
PF_GDmax=0.96;
ang_GDmax=acos(PF_GDmax);
PF_GDmin=0.92;
ang_GDmin=-acos(PF_GDmin);
PL_atual=PL;

runtime=100;%Quantidade de vezes que o algoritmo da Colônia de abelhas irá
rodar

GlobalMins=zeros(1,runtime);

for r=1:runtime

    %Todas as fontes de comida são inicializadas
    %As variáveis vão esta na faixa de valor de [lb,ub].

    Range = repmat((ub-lb), [FoodNumber 1]);
    Lower = repmat(lb, [FoodNumber 1]);
    Foods = rand(FoodNumber,D) .* Range + Lower;
    ang_GD= rand(FoodNumber,D) .* (ang_GDmax-ang_GDmin) + ang_GDmin;

    ValorObjetivo

    Fitness=calculateFitness(abs(ObjVal));

    %Inicializa o vetor trial que é o contador de tentativas
    trial=zeros(1,FoodNumber);

    %A melhor fonte de comida é registrada
    BestInd=find(ObjVal==min(ObjVal));
    BestInd=BestInd(end);
    GlobalMin=ObjVal(BestInd);
    GlobalParams=Foods(BestInd,:);

    % tic
    to=cputime;
    iter=1;
    while(iter<maxCycle)

%%INICIO DO ALGORITMO COLONIA ARTIFICIAL DE ABELHAS%%
%%ETAPA DA ABELHA EMPREGADA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        for i=1:(FoodNumber)

            %Os parâmetros para serem mudados é determinado de forma
aleatória
            Param2Change=fix(rand*D)+1;

```

```

        %Uma solução aleatoriamente escolhida é usada na produção de
uma nova solução
        neighbour=fix(rand*(FoodNumber))+1;

        %As soluções selecionadas aleatoriamente devem ser diferentes
da solução original
        while(neighbour==i)
            neighbour=fix(rand*(FoodNumber))+1;
        end;

        sol=Foods(i,1);
        P=P_anterior;
        Q=Q_anterior;
        vb=vb_anterior;
        %  $v_{ij}=x_{ij}+\phi_{ij}(x_{kj}-x_{ij})$ 
        sol(Param2Change)=Foods(i,Param2Change)+(Foods(i,Param2Change)-
Foods(neighbour,Param2Change))*(rand-0.5)*2;

        %Se o valor do parâmetro gerado estiver fora dos limites, ele
será deslocado para os limites
        ind=find(sol<lb);
        sol(ind)=lb(ind);
        ind=find(sol>ub);
        sol(ind)=ub(ind);

        %Avaliar nova solução
        ValorObjetivoSol
        P=P_anterior;
        Q=Q_anterior;
        vb=vb_anterior;
        FitnessSol=calculateFitness(abs(ObjValSol));

        %A seleção da melhor fonte é aplicada entre a solução atual i e
a criada
        if (FitnessSol>Fitness(i)) %Se a solução criada for melhor que
a solução atual i, substitui a solução atual pela criada e redefine o
contador de teste da solução i
            Foods(i,:)=sol;
            Fitness(i)=FitnessSol;
            ObjVal(i)=ObjValSol;
            trial(i)=0;
        else
            trial(i)=trial(i)+1; %se a solução não puder ser
aprimorada, aumente seu contador de teste
        end;
    end;

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ETAPA DAS ABELHAS OBSERVADORAS%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    i=1;
    t=0;
    while(t<FoodNumber)
        if(rand< max(Fitness))
            t=t+1;
            %O parâmetro a ser alterado é determinado aleatoriamente
            Param2Change=fix(rand*D)+1;
        end;
    end;

```

```

        %Uma solução escolhida aleatoriamente é usada na produção
de uma nova solução baseada da solução i
        neighbour=fix(rand*(FoodNumber))+1;

        %A solução selecionada aleatoriamente deve ser diferente da
solução i
        while(neighbour==i)
            neighbour=fix(rand*(FoodNumber))+1;
        end;

        sol=Foods(i,:);
        P=P_anterior;
        Q=Q_anterior;
        vb=vb_anterior;
        %  $v_{ij}=x_{ij}+\phi_{ij}*(x_{kj}-x_{ij})$ 
sol(Param2Change)=Foods(i,Param2Change)+(Foods(i,Param2Change)-
Foods(neighbour,Param2Change))*(rand-0.5)*2;

        %Se o valor do parâmetro gerado estiver fora dos limites,
ele será deslocado para os limites
        ind=find(sol<lb);
        sol(ind)=lb(ind);
        ind=find(sol>ub);
        sol(ind)=ub(ind);

        %Avalia a nova solução
        ValorObjetivoSol
        FitnessSol=calculateFitness(abs(ObjValSol));

        %Uma seleção melhorada é aplicada entre a solução atual i e
a sua nova solução gerada
        if (FitnessSol>Fitness(i)) %Se a solução nova gerada for
melhor que a solução atual i, substitui a solução pela recém criada e
reinicia o contador de teste da solução i
            Foods(i,:)=sol;
            Fitness(i)=FitnessSol;
            ObjVal(i)=ObjValSol;
            trial(i)=0;
        else
            trial(i)=trial(i)+1; %se a solução não puder ser
aprimorada, aumenta o contador trial
        end;
    end;
    i=i+1;
    if (i==(FoodNumber)+1)
        i=1;
    end;
end;

%A melhor fonte de alimento é memorizada
ind=find(ObjVal==min(ObjVal));
ind=ind(end);
if (ObjVal(ind)<GlobalMin)
    GlobalMin=ObjVal(ind);
    GlobalParams=Foods(ind,:);
end;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ETAPA DA ABELHA CAMPEIRA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    %Determinar as fontes de alimentos cujo contador trial excede o
valor "limite".
    %No CAA básico, apenas uma abelha escoteira pode ocorrer em cada
ciclo

    ind=find(trial==max(trial));
    ind=ind(end);
    if (trial(ind)>limit)
        trial(ind)=0;
        sol=(ub-lb).*rand(1,D)+lb;
        P=P_anterior;
        Q=Q_anterior;
        vb=vb_anterior;
        ValorObjetivoSol
        FitnessSol=calculateFitness(abs(ObjValSol));
        Foods(ind,:)=sol;
        Fitness(ind)=FitnessSol;
        ObjVal(ind)=ObjValSol;
    end;

    iter=iter+1;

    fluxdepot

end
%%FIM CAA
dt=cputime-to;
P=P_anterior;
Q=Q_anterior;
vb=vb_anterior;
for jjj=1:length(pos)
    %Nova Potência
    P(pos(jjj,1),1)=P(pos(jjj,1),1)-GD_tam(pos(jjj,1),1);
    Q(pos(jjj,1),1)=Q(pos(jjj,1),1)+GD_tam(pos(jjj,1),2);
    %Nova Tensão
    vb(pos(jjj,1),1)=complex(cos(ang_GD(jjj,1)),sin(ang_GD(jjj,1)));
end
fluxdepot
GlobalMins(r)=GlobalMin;
if(PL<PL_atual)
    Dados.Ploss=PL*100000;
    Dados.Qloss=QL*100000;
    Dados.Colonia=NP;
    Dados.limite=limit;
    Dados.Maxiter=maxCycle;
    Dados.tempo=dt;
    Dados.P_GD=GD_tam(pos(1,1),1)*100000;
    Dados.Q_GD=GD_tam(pos(1,1),2)*100000;
    Dados.S_GD=abs(GD_tam(pos(1,1),3))*100000;
    Dados.V_min=min(vbp(:,1));
    Dados.V_best=vbp;
    Dados.Loc_GD=pos;
    PL_atual=PL;
end
P=P_anterior;
Q=Q_anterior;
vb=vb_anterior;
end

```

```
%FIM CODIGO%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%CALCULATEFITNESS%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%%
```

```
%INICIO CODIGO%
```

```
function fFitness=calculateFitness (fObjV)  
fFitness=zeros (size (fObjV));  
ind=find (fObjV>=0);  
fFitness (ind)=1./ (fObjV (ind)+1);  
ind=find (fObjV<0);  
fFitness (ind)=1+abs (fObjV (ind));
```

```
%FIM CODIGO%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%ValorOjetivo%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%INICIO CODIGO%
```

```
%DETERMINANDO A LOCALIZAÇÃO E A PENETRAÇÃO DA GD
```

```
for jjj=1:FoodNumber  
    for jji=1:length (pos)  
        %Determinar as Potencias ativa, reativa e aparente para um fator de  
potência fixo aleatoriamente  
        GD_tam (pos (jji,1),1)=Foods (jjj,1);
```

```
GD_tam (pos (jji,1),2)=GD_tam (pos (jji,1),1)*tan (ang_GD (jjj,1));%Calcula o  
reativo gerado devido o fator de potencia
```

```
GD_tam (pos (jji,1),3)=complex (GD_tam (pos (jji,1),1),GD_tam (pos (jji,1),2));%Ca  
lcula a potência aparente
```

```
    %Localização
```

```
    GD_loc (pos (jji,1),1)=1;
```

```
    %Nova Potência
```

```
    P (pos (jji,1),1)=P (pos (jji,1),1)-GD_tam (pos (jji,1),1);
```

```
    Q (pos (jji,1),1)=Q (pos (jji,1),1)+GD_tam (pos (jji,1),2);
```

```
    %Nova Tensão
```

```
    vb (pos (jji,1),1)=complex (cos (ang_GD (jjj,1)),sin (ang_GD (jjj,1)));
```

```
end
```

```
for s=1:10
```

```
    for ik=1:no%Calcula o vetor de corrente complexa
```

```
        nlc (ik,1)=conj (complex (P (ik,1),Q (ik,1)))/ (vb (ik,1));
```

```
    end
```

```
    nlc;
```

```
    for ik=1:br%Ajusta a posição das correntes no vetor
```

```
        Ibr (ik,1)=nlc (ik+1,1);
```

```
    end
```

```
    Ibr;
```

```
    xy=length (adjcb (1,:));
```

```
    for ik=br-1:-1:1
```

```
        for k=1:xy
```

```

        if adjcb(ik,k)~=0
            u=adjcb(ik,k);
            Ibr(ik,1)=Ibr(ik,1)+Ibr(u,1);
        end
    end
end
Ibr;
for ik=2:no
    g=0;
    for a=1:b
        if xy>1
            if adjcb(a,2)==ik-1
                u=adjcb(a,1);
                vb(ik,1)=(vb(u,1))-((Ibr(ik-1,1))*complex((R(ik-
1,1)),X(ik-1,1))));
                g=1;
            end
            if adjcb(a,3)==ik-1
                u=adjcb(a,1);
                vb(ik,1)=(vb(u,1))-((Ibr(ik-1,1))*complex((R(ik-
1,1)),X(ik-1,1))));
                g=1;
            end
        end
    end
    if g==0
        vb(ik,1)=(vb(ik-1,1))-((Ibr(ik-1,1))*complex((R(ik-
1,1)),X(ik-1,1))));
    end
end
end
vbp=[abs(vb) angle(vb)*180/pi];
Ibrp=[abs(Ibr) angle(Ibr)*180/pi];
PL(1,1)=0;
QL(1,1)=0;
for fi=1:br
    Pl(fi,1)=(Ibrp(fi,1)^2)*R(fi,1);
    Ql(fi,1)=X(fi,1)*(Ibrp(fi,1)^2);
    PL(1,1)=PL(1,1)+Pl(fi,1);
    QL(1,1)=QL(1,1)+Ql(fi,1);
end
ObjVal(jjj,1)=complex(PL,QL);
P=P_anterior;
Q=Q_anterior;
vb=vb_anterior;
end

%FIM CODIGO%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%ValorObjetivoSol%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%INICIO CODIGO%

% DIMENSIONANDO TAMANHO ÓTIMO DA GD
for jji=1:length(pos)
    %Determinar as Potencias ativa, reativa e aparente para um fator de
potência fixo aleatoriamente
    GD_tam(pos(jji,1),1)=sol;
end

```

```

GD_tam(pos(jji,1),2)=GD_tam(pos(jji,1),1)*tan(ang_GD(jjj,1));%Calcula o
reativo gerado devido o fator de potencia

GD_tam(pos(jji,1),3)=complex(GD_tam(pos(jji,1),1),GD_tam(pos(jji,1),2));%Ca
lcula a potência aparente
%Localização
GD_loc(pos(jji,1),1)=1;
%Nova Potência
P(pos(jji,1),1)=P(pos(jji,1),1)-GD_tam(pos(jji,1),1);
Q(pos(jji,1),1)=Q(pos(jji,1),1)+GD_tam(pos(jji,1),2);
%Nova Tensão
vb(pos(jji,1),1)=complex(cos(ang_GD(jjj,1)),sin(ang_GD(jjj,1)));
end
for s=1:10
for ik=1:no%Calcula o vetor de corrente complexa
nlc(ik,1)=conj(complex(P(ik,1),Q(ik,1)))/(vb(ik,1));
end

nlc;

for ik=1:br%Ajusta a posição das correntes no vetor
Ibr(ik,1)=nlc(ik+1,1);
end

Ibr;
xy=length(adjcb(1,:));

for ik=br-1:-1:1
for k=1:xy
if adjcb(ik,k)~=0
u=adjcb(ik,k);
%Ibr(i,1)=nlc(i+1,1)+Ibr(k,1);
Ibr(ik,1)=Ibr(ik,1)+Ibr(u,1);
end
end
end

Ibr;

for ik=2:no
g=0;
for a=1:b
if xy>1
if adjcb(a,2)==ik-1
u=adjcb(a,1);
vb(ik,1)=((vb(u,1))-((Ibr(ik-1,1))*complex((R(ik-
1,1)),X(ik-1,1)))));
g=1;
end
if adjcb(a,3)==ik-1
u=adjcb(a,1);
vb(ik,1)=((vb(u,1))-((Ibr(ik-1,1))*complex((R(ik-
1,1)),X(ik-1,1)))));
g=1;
end
end
end
if g==0
vb(ik,1)=((vb(ik-1,1))-((Ibr(ik-1,1))*complex((R(ik-
1,1)),X(ik-1,1)))));

```

```

        end
    end
end

vbp=[abs(vb) angle(vb)*180/pi];
Ibrp=[abs(Ibr) angle(Ibr)*180/pi];
PL(1,1)=0;
QL(1,1)=0;

for fi=1:br
    Pl(fi,1)=(Ibrp(fi,1)^2)*R(fi,1);
    Ql(fi,1)=X(fi,1)*(Ibrp(fi,1)^2);
    PL(1,1)=PL(1,1)+Pl(fi,1);
    QL(1,1)=QL(1,1)+Ql(fi,1);
end
ObjValSol=complex(PL,QL);

```

```
%FIM CODIGO%
```