



**Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP**  
**Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas**  
**Campus João Monlevade**

---



**UFOP**

Universidade Federal  
de Ouro Preto

**Trabalho de Conclusão de Curso**

**Alocação Ótima de Banco de Capacitores em Redes de Média Tensão**  
**utilizando uma Técnica de Otimização Vagalumes**

**Ana Clara Antunes de Moraes Rocha**

João Monlevade, MG

2021

Ana Clara Antunes de Moraes Rocha

**Alocação Ótima de Banco de Capacitores em Redes de Média Tensão  
Utilizando uma Técnica de Otimização Vagalumes**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof<sup>o</sup> Dr. Wilingthon Guerra Zvietcovich

João Monlevade, MG

2021

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R672a Rocha, Ana Clara Antunes de Moraes .  
Alocação ótima de banco de capacitores em redes de média tensão  
utilizando uma técnica de otimização vagalumes. [manuscrito] / Ana  
Clara Antunes de Moraes Rocha. - 2021.  
36 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Wilington Zvietcovich.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia  
Elétrica .

1. Capacitores . 2. Falhas de energia elétrica. 3. Energia elétrica -  
Distribuição. 4. Otimização matemática . I. Zvietcovich, Wilington. II.  
Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621.31

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



### FOLHA DE APROVAÇÃO

Ana Clara Antunes de Moraes Rocha

ALOCAÇÃO ÓTIMA DE BANCO DE CAPACITORES EM REDES DE MÉDIA TENSÃO UTILIZANDO UMA TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO VAGALUMES

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista

A defesa desta monografia foi substituída por publicação de artigo em evento científico conforme no § 3º do artigo 5º da Resolução Coee nº11/2018.

Versão final Aprovado em 25 de outubro de 2021

De acordo

Wilingthon Guerra Zvietcovich

Wilingthon Guerra Zvietcovich, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 26/10/2021



Documento assinado eletronicamente por **Wilingthon Guerra Zvietcovich, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/10/2021, às 15:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0237523** e o código CRC **60E7AED8**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.011294/2021-25

SEI nº 0237523

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000  
Telefone: - www.ufop.br

## RESUMO

Este trabalho trata o Problema de Alocação Ótima de Banco de Capacitores (PAOBC) utilizando um método de otimização para reduzir as perdas elétricas ativas em uma rede elétrica, garantindo que a mesma opere com um perfil de tensões dentro de uma faixa estabelecida. Alocar significa determinar os tipos, tamanhos, localizações e esquema de controle dos bancos alocados na rede elétrica. Neste trabalho, a técnica de otimização utilizada para resolver o PAOBC é a meta-heurística Vagalume, inspirado no processo de bioluminescência dos insetos vagalumes. Esse algoritmo inicia com um número elevado de banco de capacitores, para depois, gradativamente, diminuir, até encontrar uma configuração que apresente um número mínimo de banco de capacitores, bem como a indicação do local onde deve ser instalado cada um deles, de modo a garantir que a rede elétrica opere com mínimas perdas e com tensões dentro de um faixa pré-estabelecida. A metodologia proposta é aplicada em duas redes considerando a existência de Geradores distribuídos, a primeira rede de 33 barras e a segunda rede de 135 barras. Para avaliar a eficiência desta metodologia, os resultados foram comparados com o Algoritmo de Seleção Clonal.

**Palavras chave:** Alocação de banco de capacitores, Meta-heurística Vagalume, Sistemas de Distribuição, Otimização.

## **ABSTRACT**

This paper addresses the Optimal Capacitor Bank Allocation Problem (PAOBC) using an optimization method to reduce the active electrical losses in a power grid by ensuring that it operates with a voltage profile within a set range. Allocating means determining the types, sizes, locations, and control scheme of the banks allocated in the power grid. In this paper, the optimization technique used to solve the PAOBC is the Firefly metaheuristic, inspired by the firefly insects' bioluminescence process. This algorithm starts with a high number of capacitor banks and then gradually decreases until it finds a configuration that presents a minimum number of capacitor banks, as well as the indication of the place where each one should be installed, in order to guarantee that the electrical grid operates with minimum losses and with voltages within a pre-established range. The proposed methodology is applied to two grids considering the existence of distributed generators, the first 33-bar grid and the second 135-bar grid. To evaluate the efficiency of this methodology, the results were compared with the Clonal Selection Algorithm.

**Keywords:** Capacitor bank allocation, Vagalume metaheuristics, Distribution systems, Optimization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Parte de uma rede elétrica.....	18
Figura 2. Atratividade entre Vagalumes .....	21
Figura 3. Curva Atratividade ( $\beta$ ) Vs Distância (r).....	25
Figura 4. Perfil do nível de tensão – Rede de 135 barras com GDs (F.C. = 1,3) .....	31
Figura 5. Curva de redução de perdas elétricas e atendimento da restrição $ V  > 0,95$ – Rede 135 barras com GDs (F.C =1,3).....	31

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Faixas Admissíveis para as tensões 230/127V e 230/115V (ANEEL).....	16
Tabela 2.Representação de uma solução .....	23
Tabela 3.Representação da avaliação de uma solução.....	23
Tabela 4.Distância da barra 7 às demais barras .....	24
Tabela 5.Soluções (posições de vagalumes).....	25
Tabela 6.Distâncias entre as barras do Vagalume i e Vagalume j.....	25
Tabela 7.Distâncias do Vagalume i ao Vagalume j(Vdist).....	25
Tabela 8.Padronização do Valor da Atratividade ( $\beta$ ) – Rede 33 barras .....	26
Tabela 9.Padronização do Valor $ \text{rand}-1 $ .....	26
Tabela 10.Dados dos parâmetros da metodologia .....	27
Tabela 11.Dados de Operações das RDEEs .....	27
Tabela 12.Resultados da RDEE de 33 barras (F.C.=1,0).....	28
Tabela 13.Resultados da RDEE de 33 barras (F.C.=1,3).....	28
Tabela 14.Resultados da RDEE de 33 barras com GDs .....	29
Tabela 15.Resultados da RDEE de 135 barras .....	29
Tabela 16.Resultados da RDEE de 135 barras com GDs .....	30

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

PAOBC – Problema de Alocação Ótima de Banco de Capacitores

QEE – Qualidade de Energia Elétrica

ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica

RDEE – Rede de Energia Elétrica

SDEE – Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

SDR – Sistema de Distribuição Radial

AG – Algoritmos Genéricos

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>13</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>	<b>14</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
1.1. Objetivos .....	9
1.2. Divisão do trabalho .....	10
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>11</b>
<b>3. MODELAGEM DO PROBLEMA .....</b>	<b>16</b>
3.1. Problema de Alocação de Banco de Capacitores .....	16
3.2. Modelo Matemático do Problema de Alocação Ótima de Banco de Capacitores PAOBC	
17	
<b>4. TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO VAGALUMES.....</b>	<b>20</b>
4.1. Vagalumes Aplicado ao PAOBC .....	22
4.1.1. Representação de uma Solução .....	22
4.1.2. Avaliação de uma solução .....	23
4.1.3. População Inicial .....	23
4.1.4. Movimentação dos Vagalumes.....	24
4.1.5. Critério de Parada .....	26
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>27</b>
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>32</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) é um órgão criada pelo Estado Brasileiro, logo após o início das algumas privatizações das empresas do setor, responsável pela fiscalização e regulamentação do mercado elétrico, fazendo com que haja uma desintegração das atividades do setor, em geração, transmissão e distribuição, inclusive a comercialização.

O setor elétrico brasileiro teve um crescimento durante os últimos cinquenta, sessenta e setenta anos. Nesta época garantir a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) ficou cada vez mais difícil para as concessionárias de energia elétrica, devido à aspectos como: aumento das cargas, crescimento da rede elétrica (deixando mais complexa), uso de cargas não lineares (gerando correntes harmônicas), desligamentos inesperados e faltas elétricas entre outros.

A resolução da ANEEL nº 22 505 (ANEEL, 2001) estabelece as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente e apresenta faixas adequadas de variação de tensão para as respectivas tensões nominais nos pontos de entrega ou conexão que a concessionária é obrigada a fornecer aos seus consumidores.

Sendo assim, além de estabelecer limites aceitáveis para os níveis de tensão a ANEEL também estabelece tempos de duração da tensão na faixa crítica e precária, sendo estas as classificações de tensão de atendimento. Quanto aos efeitos dessa variação de tensão se destacam a falha de equipamentos por falta de tensão, queima de equipamentos por sobre tensão entre outros. Quando esses limites são excedidos há um prazo para a regularização da tensão, em que quando não é atendido leva a uma penalização das concessionárias da empresa.

Uma das medidas para adequar a operação dentro dos níveis de tensão adequados é através da instalação de banco de capacitores na RDEE (Rede de Distribuição de Energia Elétrica). Com essa instalação e um dimensionamento adequado é possível nos alimentadores primários dos sistemas de distribuição compensar a potência reativa indutiva e assim obter um melhor perfil de tensão, conseqüentemente uma redução das perdas de potência e energia e com isso há um aumento da capacidade da rede em atender o crescimento da carga ativa.

A maior dificuldade das concessionárias é em relação as características dos equipamentos, ou seja, a capacidade dos bancos capacitivos e o local adequado no alimentador para instalação dos dispositivos. Então é necessário realizar um estudo para alocação e instalação desses bancos de capacitores que atenda critérios técnicos e econômicos.

Neste trabalho, trata-se o problema de alocação ótima de banco de capacitores (PAOBC) em redes de média tensão utilizando a técnica de otimização de Vagalume. Para tal, a metodologia utilizada é meta-heurística baseada em fenômenos bioinspirados, em que se baseia no comportamento dos vagalumes.

## 1.1. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é implementar a meta-heurística Vagalumes para solucionar o problema de PAOBC nas RDEE com a finalidade de reduzir as perdas elétricas ativas e consequentemente melhorar o perfil de tensão, atendendo às exigências das normas, mais especificamente as variações de tensão de longa duração.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Construir o modelado matematicamente do problema de PAOBC dentro da área de otimização.
- Implementar um fluxo de carga para redes elétricas o qual foi utilizado para a avaliar a função objetivo do modelo matemático.
- Propor uma adaptação na técnica de Vagalume para o problema PAOBC.
- Comparar os resultados obtidos com o algoritmo de seleção Clonal.

## 1.2. Estrutura do trabalho

O trabalho será apresentado em 5 capítulos. No capítulo 1 – *“Introdução”*, descreve a motivação e justificativa do problema, destacando os objetivos, importância no meio acadêmico e o seu contexto na engenharia elétrica.

No capítulo 2 – *“Revisão Bibliográfica”*, aborda-se os trabalhos recentes de outros autores que utilizam o mesmo tema que este trabalho foi desenvolvido.

No capítulo 3 – *“Modelagem do Problema”*, apresenta-se a metodologia utilizada para a formatação do PAOM e apresenta a técnica meta-heurística VNS.

No capítulo 4 – *“Técnica de Otimização Vagalumes”*, detalha-se a metodologia Vagalumes adaptada para resolução do PAOBC, descrevendo o passo a passo do algoritmo.

No capítulo 5 – *“Resultados e Discussões”*, apresentam-se os resultados obtidos a partir da implementação computacional do algoritmo Vagalumes aplicado ao PAOBC em uma rede de 33 barras do IEEE e outra de 135 barras inserindo Geradores Distribuídos (GDs).

Finalmente, no capítulo 6 – *“Conclusão”*, apresenta-se a conclusão evidenciando a relevância do estudo para o meio acadêmico e para o setor de engenharia elétrica em geral. Assim como indica-se trabalhos futuros visando aprimorar a pesquisa.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O setor elétrico brasileiro realizou nas últimas décadas alterações em sua estrutura e regulamentação. Sendo uma delas a criação da ANEEL responsável pela regulamentação e fiscalização do setor elétrico brasileiro. Dentre vários aspectos fiscalizados pela ANEEL está o nível de tensão disponibilizada aos consumidores, tanto para individuais quanto para coletivos por parte das empresas distribuidoras de energia elétrica.

Sendo assim, estas empresas são obrigadas a investir na adequação da operação das suas redes elétricas. Neste caso nos níveis de tensão, sendo este índice conhecido como variação de tensão de longa duração. Para isso, diversas estratégias são utilizadas pelas empresas distribuidoras, como por exemplo, instalação de reguladores de tensão, ajustes de taps dos transformadores e instalação de bancos de capacitores, sendo este último o foco deste trabalho. Nesta última estratégia, um dos desafios é alocar estes equipamentos de forma eficiente e a baixos custos, determinando o número, a localização, o tamanho, tipo, e o tempo de chaveamento.

A escolha de uma das formas possíveis de corrigir a tensão depende das características físicas de cada rede elétrica e suas características de operação, níveis de tensão e da sua variação da em relação aos limites toleráveis. Uma das alternativas mais usuais são a utilização de bancos de capacitores, por seu baixo custo e fácil instalação e reguladores de tensão, por sua efetividade no controle da tensão. (GASPERIN, 2008).

Gasperin (2008) apresenta como solução para o PAOBC métodos simplificados de representação e a aplicação de algoritmos de programação inteira mista. Sendo o objetivo a regulação de tensão considerando valores de tensão mínimos e máximos para o correto funcionamento de todas as cargas ligadas rede elétrica durante o período de funcionamento. Isto é necessário, pois cada equipamento elétrico é desenvolvido para que opere dentro de uma determinada faixa de valores em torno da sua tensão nominal.

Júnior (2009) apresenta um modelo de programação não linear inteiro misto multiobjetivo, para resolver o problema de alocação de banco de capacitores fixos e chaveados. Sendo assim, foram propostos dois algoritmos genérico multiobjetivo e um algoritmo Busca Tabu multiobjetivo. Algoritmos de otimização multiobjetivos identificam o conjunto de soluções levando-se em consideração as funções objetivo que estão sendo analisadas, indicando em quais barras devem ser alocados os bancos de capacitores como também o tipo, além dos ajustes dos

controles de injeção de potência reativa se este for chaveado. A metodologia foi efetuada em um alimentador de distribuição com 69 barras e outro alimentador real de 948 barras.

A abordagem multiobjetivo é importante na solução do problema, e permite ao planejador decidir a melhor relação entre os custos de investimentos e a qualidade do perfil das magnitudes de tensão na rede de distribuição. (JUNIOR, 2009).

Lazo (2014) utiliza uma técnica heurística construtiva visando ser mais rápida para gerar uma solução factível inicial mais rápida. Em seguida utiliza uma metaheurística especializada de Busca em Vizinhança Variável Descendente para desenvolver um processo de otimização de forma que seja possível encontrar uma solução de boa qualidade. O modelo tem como objetivo minimizar os custos de investimento, melhorar o fator de potência e minimizar os desvios de tensão para melhorar a QEE nos SDR (Sistema de Distribuição Radial). A metodologia foi avaliada em três redes elétricas, de 34, de 70 e de 202 barras.

HAFFNER (2009) solucionou o PAOBC considerando a minimização das violações dos limites de tensão definidos pela resolução N°505/2001 da ANEEL. Para o qual feito um ajuste do tap de operação dos transformadores de distribuição e da instalação de bancos de capacitores fixos, considerando a variação horária da carga.

No modelo apresentado neste trabalho, foram desenvolvidas soluções lineares para vários problemas: 1) o valor absoluto da violação dos limites de tensão é representado por intermédio da inclusão de uma variável auxiliar e restrições lineares; 2) os limites móveis de tensão, que dependem da derivação (tap) que o transformador está operando, são representados por uma tensão de referência, a qual pode ser ajustada dentro dos limites físicos de cada transformador; 3) a restrição não-linear que limita a magnitude da corrente nos condutores é representada de modo quase exato por restrições lineares de canalização; e 4) os limites nas tensões e as restrições de investimento não tornam o problema inviável. (HAFFNER, 2009).

De acordo com Alcântara (2005), o local ótimo para instalação dos bancos de capacitores é determinado utilizando a programação matemática combinatória, via métodos heurísticos e métodos baseados na inteligência artificial, mais especificamente em métodos baseados em Algoritmos Genéricos. Foi proposto neste trabalho um método heurístico baseado em fatores de Participação Reativos das barras de SDEE.

Determinação da influência da modelagem do sistema e da carga dependente da tensão na solução do problema, a inclusão de objetivos técnicos relacionados ao controle de tensão, custos

de operação e de manutenção, e perdas de potência e energia, resultando numa nova formulação multicritério com critérios conflitantes para o problema, e a viabilidade da aplicação de Algoritmos Genéticos como método de solução dessa nova formulação, re-explorando assim os conceitos básicos associados ao PAOBC em redes de distribuição de energia elétrica, identificando-se novos fatores a serem considerados. (ALCÂNTARA,2005).

Beê (2007) utiliza a técnica de otimização Algoritmos Genéricos inspirado nos conceitos evolutivos e na teoria de seleção natural. O modelo minimiza as perdas ativas, os custos dos bancos de capacitores, as penalizações dos limites de tensão (quedas de tensão acima de 4% a partir da saída do alimentador) e as correntes inrush que surgem quando da energização dos bancos de capacitores. Para avaliação da metodologia foram utilizadas redes radiais de 11 e 70 barras.

Neste trabalho, a rede elétrica de 11 barras foi utilizada, primeiramente, para se testar a formulação matemática e o comportamento dos Algoritmos Genéticos na resolução do problema, alocando-se banco de capacitores fixos e automáticos. A fim de se analisar a sensibilidade da metodologia desenvolvida, foram realizadas várias simulações alocando-se bancos fixos, que englobam diferentes combinações de critérios de otimização. O sistema de 70 barras foi modificado aumentando-se o seu carregamento em 50% a fim de torná-lo mais crítico em termos de perfil de tensão e perdas. (BEÊ, 2007)

A proposta apresentada por Pereira (2015) é para minimizar as perdas na rede e otimizar os indicadores de QEE determinados pela ANEEL através da alocação de banco de capacitores paralelos e reguladores de tensão. Neste trabalho foi utilizada uma otimização por Enxame de Partículas, considerando uma modelagem trifásica de sistemas desbalanceados. Para validação da metodologia foram realizadas simulações em sistemas de 34 e 123 barras do IEEE com sua respectiva curva horária.

Augusto et al. (2011) apresentam uma metodologia baseada na aplicação de Algoritmos Genéticos ao PAOBC em RDEEs. Este problema possui natureza combinatória, tendo como principais objetivos, a redução das perdas de energia elétrica e o controle do perfil de tensão. É utilizado o algoritmo k-means, onde é empregada uma base de dados históricos com registros de cargas horárias, após a implementação desse algoritmo é possível obter uma representação da variabilidade da demanda através de k patamares de carga máxima e mínima.

Para validação da metodologia Augusto et al. (2011) realizam testes utilizando alimentadores da empresa LIGHT Serviços de eletricidade S.A., utilizando alimentadores reais, assim como o histórico de medição de carregamentos registrados pela empresa.

Madruca (2011) utilizou o método AG (Algoritmos Genéricos), através de operadores genéricos, sendo eles de alocação simultânea de banco de capacitores e reguladores de tensão e também o de fluxo de potência iterativo. Para validação da metodologia foram realizados testes em três redes elétricas, sendo o primeiro um alimentador com 177 km de extensão de rede primária, com 320 circuitos secundários. O segundo e o terceiro são de um alimentador com 276 km de rede primária e 502 circuitos secundários.

Em Vidal (2017) é apresentada uma metodologia para realizar a redução da ordem de modelos de sistemas dinâmicos utilizando a metaheurística Algoritmo Vagalumes (AV), que é um tipo de algoritmo de enxame. Esse algoritmo se inspira no comportamento social dos Vagalumes. Tal metodologia se baseia na minimização do erro das respostas, do sistema original e do modelo reduzido, para um sinal de entrada do tipo degrau unitário. Propõe-se manter as características dinâmicas do modelo original.

Para validar a metodologia, Vidal (2017) realizou três estudos de casos, onde obtiveram-se modelos reduzidos de primeira, segunda e terceira ordens para os sistemas originais de quarta, sexta e oitava ordens, respectivamente.

Leite et al. (2018) apresentaram duas técnicas metaheurísticas, primeiro o Algoritmo do Vagalume e por fim, Algoritmo do Morcego, inspiradas no comportamento de animais da natureza. A comparação foi realizada por meio de vários experimentos computacionais para otimizar funções de transferência clássicas da literatura. Eles consideram uma variedade de configurações tais como tamanho do enxame, número de avaliações da função objetivo e dimensionalidade do problema.

Para validar o desempenho do algoritmo Leite et al. (2018) escolheram seis funções de transferência, são elas: Esfera, Rosenbrock, Griewank, Rastrigin, Csendes e Schumer Steiglitz.

Couto e Silva (2015) propõem a aplicação do Algoritmo Vagalumes na otimização de funções n-dimensionais e multimodais. Esse algoritmo foi implementado para encontrar os pontos máximos e mínimos de um conjunto de funções n-dimensionais e com particularidades como a multimodalidade, ou seja, a função possui várias inflexões de sua superfície caracterizando múltiplos pontos de mínimo ou máximo. Para validar a metodologia foi construído um benchmark

contendo uma quantidade significativa de funções multimodais de acordo com sua dimensionalidade, e ampliamos a análise estatística sobre a performance do método, como por exemplo analisando a correlação entre os parâmetros de ajuste do método.

Silva et al. (2014) realiza um estudo para otimizar a distribuição de energia elétrica aos consumidores e minimizar desperdícios de per ôhmica por efeito Joule, utilizando um método computacional heurístico baseado na equação de movimento do vagalume. O algoritmo simula o movimento dos vagalumes em busca de presas ou parceiros para acasalamento, e mediante uma discretização, as posições dos insetos no espaço são relacionadas às posições das chaves no sistema elétrico. Para comprovação da metodologia foram realizados testes em 16 barras e 16 chaves, 16 barras e 21 chaves, 33 barras e 37 chaves e por fim, 70 barras e 74 chaves.

### 3. MODELAGEM DO PROBLEMA

#### 3.1. Problema de Alocação de Banco de Capacitores

O fornecimento de energia elétrica aos consumidores está ao longo das redes elétricas, desde as subestações de distribuição até os consumidores finais, visando um custo mínimo e garantindo uma boa QEE. Há pontos de vistas técnicos, econômicos e sociais importantes nos SDEE. Sendo uma característica, a grande extensão destes, acarretando em um número elevado de equipamentos e matérias, assim, como distâncias elevadas entre os pontos de consumo e as subestações de transformação, trazendo uma confiabilidade menor à rede elétrica quanto comparada aos sistemas de transmissão.

A qualidade de vida e o desenvolvimento econômico estão diretamente relacionados ao consumo contínuo de energia elétrica, nesse sentido é importante observar que houve um aumento dos custos de investimento no SDEE devido a uma maior exigência das normas que regulam o mercado de energia elétrica.

Uma das grandezas relacionadas à QEE fornecida pelas empresas de SDEE, são os níveis de tensão. Nesse contexto a ANEEL, estabelece as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente, em que apresenta faixas adequadas de variação de tensão, conforme mostrado na Tabela 1.

Classificação da Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)
Adequada	$0,93 TC \leq TL \leq 1,05 TC$
Precária	$0,90 TC \leq TL < 0,93 TC$
Crítica	$TL < 0,90TC$ ou $TL > 1,05 TC$

Tabela 1. Faixas Admissíveis para as tensões 230/127V e 230/115V (ANEEL)

O objetivo da aplicação de banco de capacitores em SDEE é a compensação da potência reativa consumida por cargas reativas ou pela indutância das linhas, fazendo com que dessa forma a regulação de tensão é mantida dentro dos limites preestabelecidos e adequados no ponto de vista de consumo, ou seja, obter um melhor perfil de tensão, redução das perdas de potência e energia elétrica, além do aumento da capacidade da rede de distribuição em atender cargas ativas.

Tendo como base o estudo do crescimento da carga, da importância da carga, da necessidade de atender os limites de tensão estabelecidos pela ANEEL e dos cálculos de perfil de

tensão do alimentador, os bancos de capacitores devem ser alocados, na prática, em locais estratégicos da RDEE.

Desta forma, a RDEE operará em condições adequadas cumprindo a regulamentação vigente utilizando uma quantidade de bancos de capacitores (otimização). Assim como atender restrições técnicas quanto ao fluxo de carga e capacidades dos elementos da RDEE (nas linhas, nos transformadores entre outros).

O PAOBC em geral é, determinar a quantidade, localização, tamanho, tipo e por fim, o esquema de controle exigido encontrando o número de bancos que devem operar em cada nível.

Um fator importante a ser considerado no PAOBC em SDEE modernos são os Geradores Distribuídos (GDs). As quais, em sua maioria são pequenas unidades geradoras conectadas ao longo dos alimentadores nas RDEE. A alocação de GDs na RDEE muda seu estado de rede passiva para rede ativa, fazendo assim com que haja necessidade de assegurar os requisitos mínimos de confiabilidade e qualidade do serviço de fornecimento de energia.

### **3.2. Modelo Matemático do Problema de Alocação Ótima de Banco de Capacitores PAOBC**

O PAOBC nas RDEEs consiste em alocar bancos de capacitores (ver Figura 1), definindo, a quantidade e o local onde devem ser instalados e o esquema de controle necessário (fixos ou variáveis). Tratando-se de bancos de capacitores variáveis, deve ser definido estes parâmetros para cada patamar de carga ou horário de consumo. A solução encontrada aplicando a metodologia proposta deve gerar um valor mínimo de perdas ativas elétricas durante um período de planejamento considerado. Assim como atender restrições de níveis de tensão (ver Tabela 1).

Na Figura 1 mostra-se uma parte de uma rede elétrica, na qual foi alocado um banco de capacitores na barra 6 (Configuração 1) com duas unidades de 300 kVAR. Ao operar a RDEE, esta consome uma perda elétrica ativa igual a 182,3 kW e apresenta um valor mínimo de tensão igual a 0,89 p.u. Este mesmo banco é conectado na barra 29 (Configuração 2) trazendo uma perda igual a 171,5 kW e tensão mínima de 0,91 p.u. Desta forma, para encontrar a melhor solução (arranjo de banco de capacitores) deverá de simular-se o banco de capacitores em cada barra e identificar-se em qual barra alocada se produz o menor valor de perdas elétricas ativas e atende as restrições dos níveis de tensão. Sendo possível fazer esta análise em redes elétricas pequenas. Já em redes maiores ou reais torna-se inviável fazer esta avaliação exaustiva, sendo necessário

modelar o problema dentro da programação inteira mista e resolvido através de técnicas de otimização.

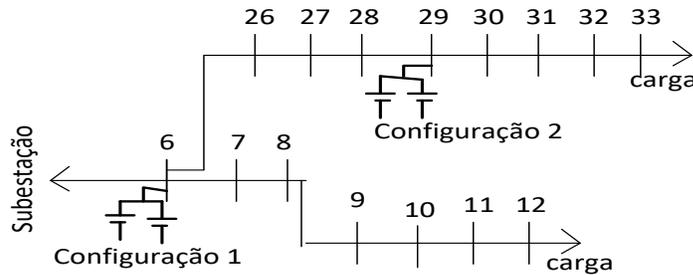


Figura 1. Parte de uma rede elétrica

Neste trabalho a formulação matemática do PAOBC foi baseada no trabalho apresentado em Baran, M. and Wu, F.F. (1989) e é dada por:

$$\min f = K_e \sum_{i=0}^{nt-1} T_i p_i(x^i) + \sum_{k=1}^{nc} f(u_k) \quad (1)$$

s.a.

$$G^i(x^i, u^i) = 0;$$

$$H^i(x^i) \leq 0;$$

$$0 \leq u \leq u^{max}$$

$$0 \leq u_k^i \leq u_k^0; \quad k \in C_1$$

$$u_k^i = u_k^0; \quad k \in C_2$$

$$i = 0, 1, \dots, nt - 1;$$

$$k = 1, 2, \dots, nc;$$

Sendo

$G^i(x^i, u^i) = 0$  : são as equações de fluxo de carga do sistema em função das variáveis de estado  $x^i$  e de controle  $u^i$ ;

$H^i(x^i) \leq 0$  : são as restrições de operação do sistema que, neste trabalho, representam os limites dos módulos de tensão das barras;

$u$  representa o vetor de bancos de capacitores nominais instalados nas barras da RDEE com limite superior o vetor  $u^{max}$  ;

$u_k^0$  : representa o ajuste do capacitor para o nível de carga de pico para uma barra  $k$  do sistema analisado;

$u_k^i$ : representa o ponto de operação do banco de capacitor instalado na barra  $k$  para um nível de carga  $i$ ;

$C_1$  e  $C_2$ : são os conjuntos de bancos de capacitores chaveados e fixos respectivamente.

Na equação (1), a primeira parcela da equação representa as perdas ativas  $p_i(x^i)$  no período  $T_i$  para o nível de carga  $i$ , sendo  $K_e$  os custos de energia (\$/kWh). Já a segunda parcela descreve custos de aquisição, instalação e manutenção dos bancos de capacitores, sejam eles fixos ou chaveados. Neste trabalho a função objetivo adotada considera somente a primeira parcela da equação, ou seja, as perdas elétricas ativas.

Com a finalidade de simplificar o modelo matemático, a equação (1) foi reduzida a equação (2) considerando que neste trabalho o foco é encontrar soluções de boa qualidade no cenário da operação da rede elétrica em um patamar de carga  $i$ .

$$\min f = p_i(x^i) \quad (2)$$

## 4. TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO VAGALUMES

Na área de engenharia elétrica ocorrem diversos problemas, parte deles podem ser resolvidos utilizando conceitos matemáticos, para isso é necessário construir seus modelos matemáticos e posteriormente resolve-os utilizando técnicas de otimização. Uma parte destes problemas tem caráter combinatório, ou seja, a solução é um arranjo de valores (modelo matemático) e na medida que o tamanho do problema aumenta, as possíveis soluções crescem exponencialmente e não podem ser resolvidos por técnicas clássicas ou exatas devido ao tempo de solução inviável.

Por outro lado, a formulação matemática deste grupo de problemas utilizando técnicas exatas é complexa. Este fato acrescenta a dificuldade para solucionar estes problemas combinatórios via técnicas exatas. Para contornar essas limitações surgem os métodos aproximados, como são as meta-heurísticas, as quais não precisam de uma formulação matemática rigorosa e encontram soluções de boa qualidade, não garantindo soluções ótimas globais.

Algumas meta-heurísticas baseiam-se em fenômenos bioinspirados, como por exemplo, Colônia de Formigas (Su, Chang e Chiou, 2005), Otimização por Enxame de Partículas (Flaih, 2016), Colônia de Bactérias (Naveen, Kumar e Rajalakshmi, 2015) e Algoritmo de Vagalumes (Yang, 2010) sendo este último a técnica utilizada neste trabalho.

A meta-heurística Vagalumes (do inglês, Firefly) proposta por Yang (2010), baseia-se no comportamento destes insetos capazes de gerar luz curta e rítmica dentro de si, devido a uma reação química e onde a fêmea responde ao macho através de um processo de bioluminescência, com objetivo não só de atração, mas também de encontrar comida e proteger-se de predadores.

Inicialmente, a meta-heurística Vagalume foi desenvolvida para resolver problemas de otimização contínua. Entretanto, essa meta-heurística foi adaptada para problemas discretos (Gerez, Belati e Santos, 2018), (Sukraj, Yuvaraj, Hariharan e Thirumalai, 2019), como é o caso deste trabalho. Na sua aplicação, três regras foram estabelecidas, sendo as seguintes:

- 1) Todos os vagalumes serão atraídos por cada um dos outros, independente do seu sexo;
- 2) A atratividade dos vagalumes é diretamente proporcional ao seu brilho e calculada pela expressão (3) ou (4), reduzindo-se o brilho com o aumento da distância  $r$  entre eles (ver Figura 2). Um vagalume de menor brilho irá se mover na direção de um vagalume de maior brilho.

3) Caso não haja um vagalume mais brilhante do que um determinado vagalume, este se moverá aleatoriamente.

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\beta_0}{1 + \gamma r^2} \quad (4)$$

$$r_{i,j} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (5)$$

em que:

$r$ : Distância entre dois Vagalumes ( $i$  e  $j$ );

$\beta_0$ : Atratividade inicial igual a 1;

$\gamma$ : Coeficiente de absorção que controla a diminuição da intensidade de luz;

$x$ :  $k$ -ésima componente da coordenada espacial;

$x_i$  e  $x_j$ : posição do  $i$ -ésimo e  $j$ -ésimo vagalume, respectivamente.

Na Figura 2 mostra-se um vagalume  $i$  deslocando-se em direção a um vagalume mais brilhante ou mais atrativo  $j$ . A posição do vagalume é dada pela seguinte expressão.

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \beta (x_j(t) - x_i(t)) + \alpha(\text{rand} - 0,5) \quad (6)$$

em que o primeiro termo indica a posição atual do vagalume  $i$ , o segundo termo representa a atração entre os vagalumes  $i$  e  $j$  e, o terceiro termo é a parte aleatória, limitada pelo parâmetro  $\alpha \in [0;1]$  e  $\text{rand}$  é um número gerado aleatoriamente no intervalo  $[0,1]$ , geralmente seguindo uma distribuição uniforme.

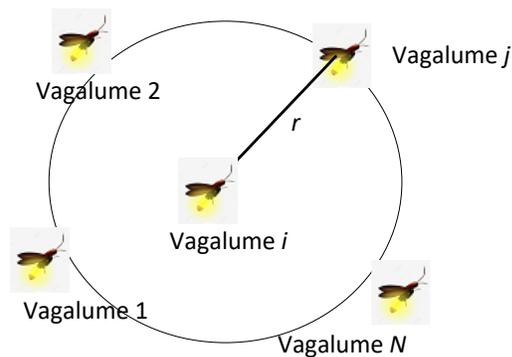


Figura 2. Atratividade entre Vagalumes

Os parâmetros utilizados nesta meta-heurística são: o tamanho da população ( $N$ ), o coeficiente de mutação ( $\alpha$ ), o valor base do coeficiente de atração ( $\beta_0$ ) e o coeficiente de absorção que controla o decaimento da intensidade de luz ( $\gamma$ ).

O pseudocódigo do algoritmo Vagalumes apresentado em Yang (2010) para problemas de natureza contínua é o seguinte:

### Procedimento do Algoritmo Vagalume

- 1 início
- 2 Definir o número de dimensões  $d$  do problema;
- 3 Definir a função objetivo  $f(x)$ ,  $(x_1, \dots, x_d)^T$ ;
- 4 Definir o número de indivíduos ( $N$ ) e o número máximo de gerações ( $ITER_{max}$ );
- 5 Gerar uma população inicial de  $N$  Vagalumes, com  $x_i (i = 1, 2, \dots, N)$
- 6 Definir o coeficiente de absorção de luz  $\gamma$ ;
- 7 Intensidade de luz  $I_i$  em  $x_i$  é determinada por  $f(x_i)$ ;
- 8 Avaliar os vagalumes da população inicial usando a função objetivo;
- 9 repita
- 10 para cada vaga-lume  $i$  faça
- 11 para cada vaga-lume  $j$  faça
- 12 se  $(I_i > I_j)$  então
- 13 Mover o vaga-lume  $i$  em direção ao vaga-lume  $j$ ;
- 14 fim
- 15 Variar a atratividade com a distância  $r$  por  $\exp[-\gamma r]$ ;
- 16 Calcular novas soluções e atualizar a intensidade de luz;
- 17 fim
- 18 fim
- 19 Ordenar os vagalumes e encontrar a melhor solução global;
- 20 até critério de parada ser atingido;
- 21 fim.

## 4.1. Vagalumes Aplicado ao PAOBC

Neste trabalho, a meta-heurística Vagalume foi adaptada para resolver o PAOBC e descrita nas seguintes seções.

### 4.1.1. Representação de uma Solução

A representação de solução da técnica Vagalume significa indicar a posição do inseto no espaço de soluções, que no caso do PAOBC será as barras (linha 1 da Tabela 2) nas quais serão instalados uma quantidade os bancos de capacitores (quantidade predefinida). Outra informação na posição do inseto é a quantidade (fixado entre 1 até  $M_{max}$ ) de unidades ((linha 2 da Tabela 2)

que estes bancos de capacitores possuirão. A modo de exemplificar, tem-se a Tabela 2 a qual representa uma solução (posição do vagalume) com 3 bancos de capacitores com 2, 1 e 1 unidades de capacitores instalados nas barras 7, 11 e 31, respectivamente.

Barra 7	Barra 11	Barra 31
2 unidades	1 unidades	1 unidades

*Tabela 2. Representação de uma solução*

#### 4.1.2. Avaliação de uma solução

No problema de PAOBC avaliar uma solução (ver equação 2) significa determinar as perdas elétricas ativas (Intensidade de luz  $I$  do vagalume – passo 7 no Procedimento do Algoritmo Vagalume) de uma determinada solução (posição do vagalume), a qual é realizada através de uma análise de fluxo de potência (Souza et al, 2006). Também deve ser determinada a quantidade de barras, cujas tensões estão fora da faixa adequada (faixa adequada 1,05 p.u. – 0,93 p.u.). Pois esta última informação indicará à metodologia para reduzir o número de bancos de capacitores. A modo de exemplificação tem-se a Tabela 3 que ilustra um exemplo para uma a solução da Tabela 2.

Perdas (kW)	Nº de barras com $0,93 \geq  V  \geq 1,05$
198,5	12

*Tabela 3. Representação da avaliação de uma solução*

Os valores da Tabela 3 foram utilizados para encontrar resultados da aplicação da equação (2) a qual modela o PAOBC.

#### 4.1.3. População Inicial

O algoritmo do Vagalume se inicia a partir de uma população (posição inicial dos vagalumes) formada por  $N$  vagalumes os quais estão distribuídos no espaço de soluções em diferentes posições (ver Figura 2), sendo cada um deles gerada aleatoriamente, de forma que os valores atribuídos às informações das posições respeitem as especificações do problema proposto (equação 1).

Para o PAOBC foi construído  $N$  soluções de forma aleatória com a finalidade de dotar à técnica a característica de esparsidade dentro do espaço de soluções.

#### 4.1.4. Movimentação dos Vagalumes

No algoritmo é necessário calcular o valor da distância  $r$  através da equação (5) para depois utilizar este valor na equação (6) que representa a nova posição do vagalume analisado  $x_j$ . Esta distância é obtida mensurando  $x_j(t) - x_i(t)$ , a qual representa a distância entre a posição do vagalume  $i$  e a posição do vagalume  $j$ , a qual é calculada utilizando um critério de distancias entre vagalumes via construção de camadas de barras e apresentado a seguir.

Inicialmente é construída uma matriz de tamanho  $n \times n$  ( $n$  é número de barras), onde a primeira linha representa a barra analisada ( $x_i$ ) e a primeira coluna a barra ( $x_j$ ) que se pretende medir distância. Os valores da matriz são as distâncias (camadas). Por exemplo, considerando-se a rede elétrica da Figura 1 é construída a distância da barra 7 às demais barras de forma ascendente (ver Tabela 4) desde a camada 1 (barras 6 e 8), Camada 2 (barras 9 e 26), Camada 3 (barras 10 e 27) e assim por diante. Desta forma é construída as distâncias para todas as barras.

DE/PARA	7	DE/PARA	7
6	1	12	5
8		29	
9	2	30	6
26		31	7
10	3	32	8
27		33	9
11	4		
28			

Tabela 4. Distância da barra 7 às demais barras

A partir das informações desta matriz determina-se a distância entre duas soluções. Por exemplo, dadas duas soluções (ver Tabela 5) é identificada a distância entre cada elemento do vagalume  $i$  e o vagalume  $j$ , sendo estas, da Barra 10 à Barra 12 igual a 2 camadas; da Barra 10 à Barra 26 = 5 camadas e da Barra 10 à Barra 6 = 4 camadas. O mesmo é feito com a Barra 7 e com a Barra 31 como ilustra a Tabela 6. Escolhe-se a menor distância (no exemplo é o valor 1 correspondente a distância entre a Barra 7 e a Barra 6) e preenche-se o vetor distância ( $Vdist$ ) mostrado na Tabela 7. Elimina-se a coluna já avaliada e a linha escolhida, até finalizar o preenchimento do  $Vdist$ .

vagalume i=	Barra 10	Barra 7	Barra 31
	2 unidades	1 unidades	2 unidades

vagalume j=	Barra 12	Barra 26	Barra 6
	2 unidades	2 unidades	3 unidades

Tabela 5. Soluções (posições de vagalumes)

DE/PARA	Barra 10	Barra 7	Barra 31
Barra 12	2	5	12
Barra 26	5	2	5
Barra 6	4	1	6

Tabela 6. Distâncias entre as barras do Vagalume  $i$  e Vagalume  $j$

vagalume $i$ =	Barra 7	Barra 10	Barra 31
vagalume $j$ =	Barra 6	Barra 12	Barra 26
Distância=	1	2	5

Tabela 7. Distâncias do Vagalume  $i$  ao Vagalume  $j$  ( $V_{dist}$ )

Conforme apresentado no capítulo 4, a técnica foi proposta para problemas com variáveis contínuas, criando a necessidade de fazer adaptações neste problema (com variáveis discretas). O valor de  $\gamma \in [0,1 a 10]$  caracteriza a variação da atratividade e é definido igual a 0,01, com a finalidade de gerar uma faixa de valores de  $\beta$  entre 0 e 1 como ilustrado na Figura 3. Esta variável real representa a intensidade da velocidade na aproximação do vagalume  $i$  para o vagalume  $j$ . Fazendo uma adaptação do valor de  $\beta$  para valores inteiros foi construída a equivalência mostrada na Tabela 8, evidenciando-se que valores indicados nesta Tabela sofrem alteração dependendo do tamanho da RDEE e da quantidade de banco de capacitores.

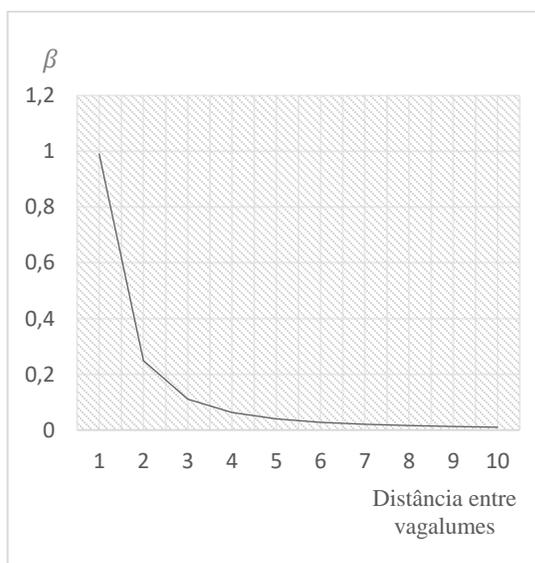


Figura 3. Curva Atratividade ( $\beta$ ) Vs Distância ( $r$ )

Faixa de valores de $\beta$	Nº de alterações do vagalume $i$
$0 \leq \beta < 0,2$	0
$0,2 \leq \beta < 0,6$	1
$0,6 \leq \beta < 1$	2

Tabela 8. Padronização do Valor da Atratividade ( $\beta$ ) – Rede 33 barras

Na Tabela 8 mostra-se a relação entre a atratividade e a instalação de equipamentos na RDEE. Por exemplo, considere que foi calculado o valor de  $\beta$  igual a 2 ajustes. Será sorteada a barra na qual será removido o banco de capacitores, supondo a Barra 31 (Tabela 7) e alocado 2 camadas em direção da Barra 26, ou seja, na Barra 29.

Outra adaptação foi realizada no ajuste do terceiro termo da equação (4), onde  $\alpha \in [0,1]$  e igual a 1, e *rand* é um gerador de números aleatórios uniformemente distribuído entre os valores de  $[0,1]$ . De forma similar foi construída a Tabela 9, indicando as equivalências com respeito à alteração do número de unidades do banco de capacitores, evidenciando-se que valores indicados na Tabela sofreram alteração dependendo do tamanho da RDEE e da quantidade de banco de capacitores.

Faixa de valores $ \text{rand}-1 $	Nº de alterações de unidades do banco de capacitores de cada barra do vagalume $i$
$0 \leq  \text{rand}-1  < 0,2$	0
$0,2 \leq  \text{rand}-1  < 0,6$	1
$0,6 \leq  \text{rand}-1  < 1$	2

Tabela 9. Padronização do Valor  $|\text{rand}-1|$

#### 4.1.5. Critério de Parada

Vários critérios podem ser utilizados para encerrar a execução da meta-heurística Vagalume como o número máximo de gerações ( $ITER_{max}$ ), o número de gerações que não se produz melhoria da solução da geração atual ( $ITER_{max}$ ), entre outros. Neste trabalho emprega-se o critério do número de gerações que não se produz melhoria da melhor solução da geração atual ( $ITER_{max}$ ).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para realizar a implementação e testes da metodologia proposta foi utilizado um computador Intel® Core™ i3, 2,8GHz, 4GB RAM no software Matlab™.

Para validar a metodologia foi testada uma RDEE de 33 barras do IEEE e comparada com o Algoritmo de Seleção Clonal (Alves et al, 2018). Em seguida, foi inserida GD nesta RDEE com a finalidade de exemplificar cenários novos, os quais se vislumbram nas RDEEs. Também foi utilizada uma RDEE real de 135 barras e inserido GDs nesta RDEE. Os dados destas RDEEs podem se encontrar em (Chis et al, 1997) e (Guimaraes et al, 2010) respectivamente.

Os valores dos parâmetros da metodologia são ilustrados na Tabela 10. Na Tabela 11 mostram-se os dados operativos das RDEEs nos diferentes patamares de carga (Fator de carregamento F.C.).

Conforme apresentado no Capítulo 4, o processo de otimização se inicia com um número elevado de bancos de capacitores até encontrar um valor mínimo que atenda o modelo matemático apresentado no Capítulo 3.

Parâmetros/Rede	33 barras	135 barras
Número máximo de unidades do banco de capacitores	3	3
Potência de cada unidade (kW)	300	300
N° de Vagalumes ( $N$ )	10	30
coeficiente de absorção de luz $\gamma$	0,01	0,01
Atratividade inicial $\beta_0$	1	1
$ITER_{max}$	10	30

Tabela 10. Dados dos parâmetros da metodologia

Faixa de valores de $ V $ p.u.	Classificação da Tensão de Atendimento	Tensão na subestação $ V $ e Fator de carregamento (FC)					
		$ V  = 1,0$ p.u FC = 0,9		$ V  = 1,0$ p.u FC = 1,0		$ V  = 0,98$ p.u FC = 1,30	
Rede Elétrica		33 barras	135 barras	33 barras	135 barras	33 barras	135 barras
$0,93 \leq  V $ e $ V  \leq 1,05$	Adequada	24	135	19	135	14	122
$0,90 \leq  V $ e $ V  < 0,93$	Precária	9	0	14	0	9	13
$ V  < 0,90$ ou $ V  > 1,05$	Crítica	0	0	0	0	10	0

Tabela 11. Dados de Operações das RDEEs

### 5.1 SDEE de 33 barras

A RDEE de 33 barras possui uma carga total de 3715 kW e 2300 kVAR e opera com perdas iguais a 202,67 kW quando o F.C. é igual a 1,0. Nas Tabela 12 e Tabela 13 apresentam-se os resultados das duas melhores soluções encontrada pela meta-heurística do Vagalume e pelo Algoritmo de Seleção Clonal, respectivamente.

Parâmetros	Algoritmo Clonal [Alves et al. 2018]		Meta-heurística Vagalume	
	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 1	Sol. 2
Nº de banco de capacitores	2	2	2	2
Barras alocadas	9; 32	11; 31	8; 30	15;31
Nº de unidades de capacitores	3; 3	3; 3	3; 2	1; 3
Quantidade de barras com  V  na faixa adequada	33	33	33	33
Perdas (kW)	143,0	144,3	139,8	141,5

Tabela 12.Resultados da RDEE de 33 barras (F.C.=1,0)

Parâmetros	Algoritmo Clonal [Alves et al. 2018]		Meta-heurística Vagalume	
	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4
Nº de banco de capacitores	4	4	4	4
Barras alocadas	6;15; 27;31	9;13; 28;30	5; 17; 31; 29	4;14; 30;31
Nº de unidades de capacitores	3;3;3;3	2;3;3;3	1;2;2;3	2;3;3;1
Quantidade de barras com  V  na faixa adequada	33	33	33	33
Perdas (kW)	251,8	276,37	242,1	242,4

Tabela 13.Resultados da RDEE de 33 barras (F.C.=1,3)

Os resultados obtidos são similares aos resultados encontrados na literatura, com a diferença no valor mínimo de perdas.

Na RDEE de 33 barras foi inserido um GD na barra 20 com potência igual a 100 kW, com a finalidade de exemplificar RDEEs reais. Na Tabela 14 mostra-se os resultados em que no patamar com F.C igual a 0,9 e 1,0 foi considerado o valor mínimo de tensão igual a 0,95 p.u.

Parâmetros	V SE=1,0 e F.C.=0,9			V SE=1,0 e F.C.=1,0			V SE=1,0 e F.C.=1,3		
	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3
Perdas Elétricas sem Banco de Capacitores (kW)	153,1			191,8			357,8		
N° de banco de capacitores	2			2			2		
Barras alocadas	15;29	14;31	10;32	16;31	16;32	17;32	31;14	31;15	32;15
N° de unidades de capacitores	2;3	2;3	3;2	2;3	2;3	2;3	3;3	3;3	3;3
Quantidade de barras com  V  na faixa adequada	33			33			33		
V mínima	0,95	0,96	0,95	0,95	0,95	0,95	0,93	0,93	0,93
Perdas Elétricas (kW)	109,5	109,8	111,2	137,1	138,4	141,1	239,8	242,7	243,9

Tabela 14. Resultados da RDEE de 33 barras com GDs

## 5.2 SDEE de 135 barras

A RDEE de 135 barras possui uma carga total de 18,31 MW e 7,93 kVAR e opera com perdas iguais a 320,28 kW quando o F.C. é igual a 1,0. O N° de alterações do vagalume *i* da Tabela 8 foi alterada e três como valor máximo. Os resultados são apresentados na Tabela 15.

Parâmetros	V SE=1,0 e F.C.=0,9			V SE=1,0 e F.C.=1,0			V SE=1,0 e F.C.=1,3		
	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3
Perdas Elétricas sem Banco de Capacitores (kW)	257,3			320,3			555,5		
N° de banco de capacitores	1			1			1		
Barras alocadas	106	107	108	106	107	108	107	108	109
N° de unidades de capacitores	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Quantidade de barras com  V  na faixa adequada	33			33			33		
V mínima	0,961	0,960	0,960	0,953	0,954	0,956	0,932	0,933	0,935
Perdas Elétricas (kW)	241,3	241,3	241,5	300,5	300,5	300,7	522,8	522,9	523,0

Tabela 15. Resultados da RDEE de 135 barras

Com a finalidade de mudar aquela restrição, quanto ao valor mínimo de tensão, alterado para 0,95 p.u. no patamar pesado (F.C. = 1,3), a metodologia proposta encontrou a

seguinte solução: barras (n° de unidades de capacitores) 10(3); 23(3); 33(1); 81(1); 120(3) gerando 502,13 kW de perdas elétricas. Depreende-se deste resultado que uma pequena alteração da restrição traz o aumento significativo do número de bancos de capacitores, incrementando de 1 banco para 5 bancos de capacitores.

De forma similar, na RDEE de 33 barras foi inserido dois GDs, cada um de 500 kW alocados nas barras 23 e 45. Os resultados ilustram-se na Tabela 16.

Parâmetros	V SE=1,0 e F.C.=0,9			V SE=1,0 e F.C.=1,0			V SE=1,0 e F.C.=1,3		
	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3
Perdas Elétricas sem Banco de Capacitores (kW)	230,2			288,2			357,8		
N° de banco de capacitores	1			1			1		
Barras alocadas	106	107	108	106	107	108	106	107	108
N° de unidades de capacitores	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Quantidade de barras com  V  na faixa adequada	33			33			33		
V mínima	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,93	0,93	0,93
Perdas Elétricas (kW)	214,2	214,2	214,2	268,5	268,5	268,5	474,2	473,6	473,5

*Tabela 16. Resultados da RDEE de 135 barras com GDs*

Observa-se que a instalação de um banco de capacitores atende o modelo matemático do problema para os três patamares (F.C.) de carregamento.

Na RDEE de 135 barras sem GDs foi alterada a restrição da tensão para 0,95 p.u. no patamar pesado (F.C. = 1,3). A metodologia proposta obteve a seguinte solução: barras (n° de unidades de capacitores) 88(3); 118(2); 119(3); 127(2); 133(2) gerando 457,01 kW de perdas elétricas.

Para esta última resposta (5 bancos de capacitores) foi construída a Figura 4 com a RDEE operando com e sem banco, a qual mostra o perfil de tensão de cada barra.

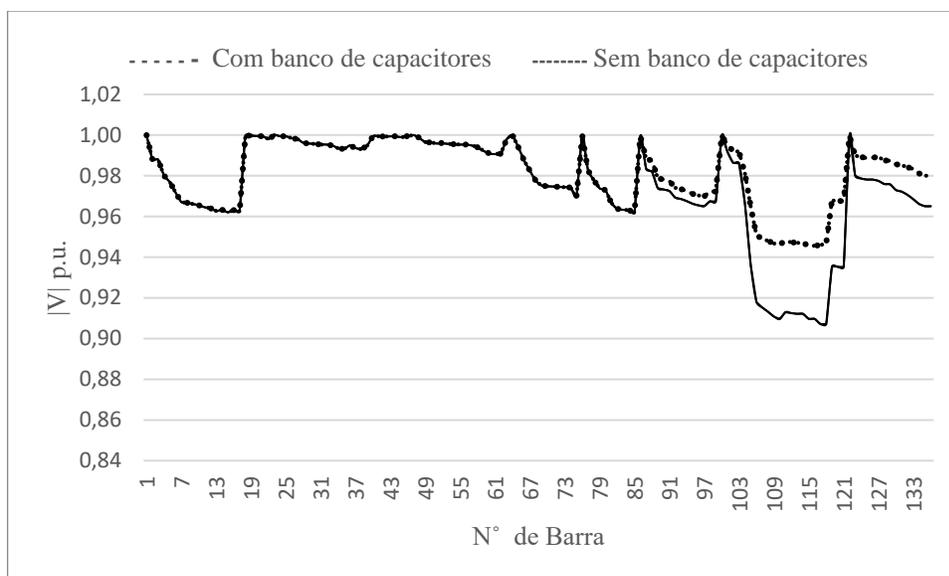


Figura 4. Perfil do nível de tensão – Rede de 135 barras com GDs (F.C. = 1,3)

Já na Figura 5 mostra-se o desempenho (evolução) da metodologia considerando esta última resposta (5 bancos de capacitores). O algoritmo inicia com uma quantidade elevada de bancos de capacitores. Ao encontrar uma configuração que satisfaz a restrição do nível de tensão ( $|V| > 0,95$ ) reduz um banco de capacitores até encontrar o mínimo e a partir desta configuração reduz as perdas elétricas.

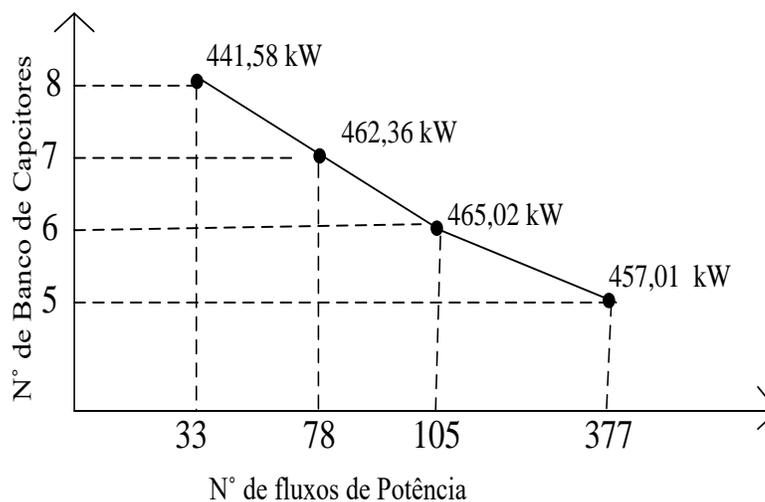


Figura 5. Curva de redução de perdas elétricas e atendimento da restrição  $|V| > 0,95$  – Rede 135 barras com GDs (F.C = 1,3)

## 6. CONCLUSÃO

. Diante da necessidade de operar os SDEEs atendendo restrições quanto aos níveis de tensão com mínimas perdas elétrica, surge a proposta de instalar ou realocar banco de capacitores para atingir esta necessidade, criando o problema de alocação de banco de capacitores.

Neste trabalho é utilizado a meta-heurística Vagalume, a qual é baseada nos comportamentos destes insetos na procura de alimento e de proteger-se frente aos predadores. Na literatura tem-se problemas de otimização resolvidas pela aplicação desta técnica.

Os resultados deste trabalho sugerem que a meta-heurística Vagalume é capaz de resolver o problema de alocação ótima de banco de capacitores, tendo como principal objetivo que a rede elétrica opere com mínimas perdas elétricas atendendo valores de tensão dentro de uma faixa pré-estabelecida. A partir dos resultados obtidos, a metodologia proposta mostra-se como um método promissor para estudos de PAOBC.

A metodologia proposta foi testada em uma RDEE de 33 barras cujos resultados foram comparados aos obtidos com o Algoritmo de Seleção Clonal, encontrando o mesmo resultado e perdas elétricas menores. A metodologia proposta foi testada também em uma RDEE de 135 barras. Os resultados obtidos foram satisfatórios uma vez que resultou em um baixo número de banco capacitores necessários para adequação das redes testadas.

Como trabalho futuro considera-se a utilização de redes reais de grande porte, nas quais provavelmente será preciso restringir o número de banco de capacitores ou selecionar um grupo de barras (trechos). Assim como a utilização de modelos de fluxo de potência para redes trifásicas.

Os resultados deste trabalho foram publicados no formato de artigo (ANA CLARA ANTUNES DE MORAES ROCHA et al.) na Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica CBQEE- 2021. Disponível em <https://proceedings.science/cbqee-2021/papers/alocacao-otima-de-banco-de-capacitores-em-sistemas-de-distribuicao-de-energia-eletrica-utilizando-a-meta-heuristica-vaga>.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL) (Brasil), Resolução N° 505 de 26 de novembro de 2001. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 27 nov. 2001. Seção 1, p. 16, v. 138, n. 226. [Acesso em: 29 jun. 2021]. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bres2001505.pdf>>.

ALCÂNTARA, M. V. P. et al. Alocação de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica. [sn], 2005.

ANA CLARA ANTUNES DE MORAES ROCHA; WILINGTHON ZVIETCOVICH; WENDY ERAS-HERRERA; JUAN CARLOS GALVIS MANSO et al. Alocação ótima de banco de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando a meta-heurística Vagalumes. In: ANAIS DA XIV CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 2021, Online. Vol 1, 2021 - 134343. Anais eletrônicos. Disponível em: <<https://proceedings.science/cbqee-2021/papers/alocacao-otima-de-banco-de-capacitores-em-sistemas-de-distribuicao-de-energia-eletrica-utilizando-a-meta-heuristica-vaga>> doi 10.17648/cbqee-2021-130543

ANEEL, PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, Revisão 12, Resolução Normativa n° 469/2011, Janeiro de 2021.

AUGUSTO, A. A. et al. Utilização de algoritmos genéticos em estratégias de alocação de banco de capacitores em redes elétricas.

BARAN, M.; WU, F. F. Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system. IEEE Transactions on Power Delivery, IEEE, v. 4, n. 1, p. 735–743, 1989.

BEÊ, R. T. Alocação de bancos de capacitores em sistema de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmos genéticos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, 2007.

CHIANG, H.-D.; JEAN-JUMEAU, R. Optimal network reconfigurations in distribution systems.ii. solution algorithms and numerical results.IEEE transactions on Power delivery, IEEE, v. 5,n. 3, p. 1568–1574, 1990.

CHIS, M.; SALAMA, M.; JAYARAM, S. Capacitor placement in distribution systems using heuristic search strategies. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, IET, v. 144, n. 3, p. 225–230, 1997.

COSTA, T. A. et al. Optimal allocation of capacitors banks in radial distribution systems using clonal algorithm. In: IEEE.2018 International Conference on Smart Grid (icSmartGrid). [S.l.],2018. p. 92–97.

COUTO, D. C. F.; SILVA, C. A. Algoritmo colônia de vaga-lumes aplicado na otimização defunções n-dimensionais. Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics, v. 3, n. 2, 2015.

EAJAL, A. A.; EL-HAWARY, M. Optimal capacitor placement and sizing in unbalanced distribution systems with harmonics consideration using particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 25, n. 3, p. 1734–1741, 2010.

FARAHANI, V.; VAHIDI, B.; ABYANEH, H. A. Reconfiguration and capacitor placement simultaneously for energy loss reduction based on an improved reconfiguration method. *IEEE Transactions on power systems*, IEEE, v. 27, n. 2, p. 587–595, 2011.

FLAIH, F. M. et al. Distribution system reconfiguration for power loss minimization and voltage profile improvement using modified particle swarm optimization. In: *IEEE.2016 IEEE PESAsia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. [S.l.], 2016. p. 120–124.

GASPERIN, L. V. et al. Alocação ótima de banco de capacitores em redes de distribuição de energia elétrica utilizando modelos simplificados. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2009.

GEREZ, C.; BELATI, E. A.; SANTOS, R. C. D. Aplicação da meta-heurística do vaga-lume ao problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia através de um espaço de busca reduzido. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. [S.l.: s.n.], 2019. v. 1, n. 1.

GUIMARAES, M.; CASTRO, C.; ROMERO, R. Distribution systems operation optimization through reconfiguration and capacitor allocation by a dedicated genetic algorithm. *IET generation, transmission & distribution*, IET, v. 4, n. 11, p. 1213–1222, 2010.

HAFFNER, S. et al. Alocação de bancos de capacitores em redes de distribuição de energia visando eliminar violações de tensão. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática*, SciELO Brasil, v. 20, p. 546–563, 2009.

JIANG, D.; BALDICK, R. Optimal electric distribution system switch reconfiguration and capacitor control. *IEEE transactions on Power Systems*, IEEE, v. 11, n. 2, p. 890–897, 1996.

JUNIOR, B. P. Alocação otimizada de bancos de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica através de metaheurísticas multiobjetivo. 2009. 192 f. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Faculdade de Engenharia . . . , 2009.

LAZO, R. E. V. Heurística especializada aplicada na alocação ótima de bancos de capacitores em sistemas de distribuição radial. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2015.

LEITE, I.; MARCONE, M.; PAIVA, F. Um breve estudo sobre os algoritmos dos vaga-lumes e dos morcegos para otimização de funções de referência. *HOLOS*, v. 4, p. 190–206, 2018.

MADRUGA, E. P. et al. Otimização de níveis de tensão nas redes de distribuição considerando a alocação de bancos de capacitores e reguladores de tensão. Universidade Federal de Santa Maria, 2011.

NAVEEN, S.; KUMAR, K. S.; RAJALAKSHMI, K. Distribution system reconfiguration for loss minimization using modified bacterial foraging optimization algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 69, p. 90–97, 2015.

PEREIRA, G. M. d. S. Alocação de bancos de capacitores e reguladores de tensão em redes elétricas inteligentes desbalanceadas. 2015.

SANTOSO, S. et al. *Electrical power systems quality*. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2012.

SILVA, L. I. da; BELATI, E. A.; JUNIOR, I. C. da S. Algoritmo heurístico de reconfiguração de sistemas elétricos de distribuição baseado na equação de movimento do vaga-lume. *Blucher Mathematical Proceedings*, v. 1, n. 1, p. 176–185, 2015.

SILVA, M. J. et al. Redução de ordem de sistemas dinâmicos utilizando inteligência computacional uma abordagem via firefly algorithm. *XIII SBAI-Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, p. 1089–1094, 2017.

SOUZA, B. et al. Fluxo de carga em sistemas de distribuição radiais com geração distribuída: Método da soma de potência modificado. *IEEE Latin America Transactions*, v. 4, n. 3, 2006.

SU, C.-T.; CHANG, C.-F.; CHIOU, J.-P. Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm. *Electric power systems research*, Elsevier, v. 75, n. 2-3, p.190–199, 2005.

SUKRAJ, K. et al. Simultaneous allocation of shunt capacitor and distributed generator in radial distribution network using modified firefly algorithm. In: *IEEE.2019 International Conference on Smart Structures and Systems (ICSSS)*. [S.l.], 2019. p. 1–5.

YANG, X.-S. *Nature-inspired metaheuristic algorithms*. [S.l.]: Luniver press, 2010.