



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ALOCÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES EM
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO COLÔNIA
DE FORMIGAS

Welton Braga de Souza

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
JOÃO MONLEVADE, MG
2017

Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia Elétrica

ALOCÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES EM
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO COLÔNIA
DE FORMIGAS

Welton Braga de Souza

Monografia apresentada ao Departamento de
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Ouro Preto como parte dos requisitos exigidos para a
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Juan Carlos Galvis Manso

João Monlevade, MG

2017

S729a

Souza, Welton Braga de.

Alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição utilizando colônia de formigas [manuscrito] / Welton Braga de Souza. - 2017.

62f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Juan Carlos Galvis Manso.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Capacitadores. 2. Energia elétrica - Distribuição. 3. Heurística. 4. Linhas elétricas. I. Manso, Juan Carlos Galvis. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621.3



ANEXO IV - ATA DE DEFESA

Aos 22 dias do mês de novembro de 2017, às 14:00 horas, no bloco B, sala 103 deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo formando **Welton Braga de Souza**, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Dr. Willington Guerra Zvietcovich, Dr. Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa e Dr. Juan Carlos Galvis Manso.

O candidato apresentou a monografia intitulada: **Alocação de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição Utilizando Colônia de Formigas**. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela **APROVAÇÃO** do candidato, com a nota média **8,5**, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo formando.

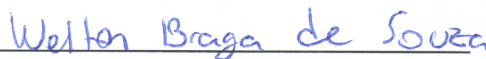
Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca Examinadora	Nota
Dr. Willington Guerra Zvietcovich	8,5
Dr. Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa	8,7
Dr. Juan Carlos Galvis Manso	8,3
Média	8,5

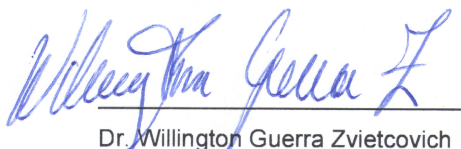
João Monlevade, 22 de Novembro de 2017.



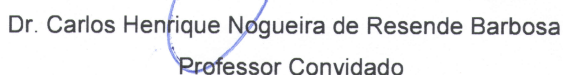
Dr. Juan Carlos Galvis Manso
Professor Orientador



Welton Braga de Souza
Aluno



Dr. Willington Guerra Zvietcovich
Professor Convidado



Dr. Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa
Professor Convidado



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica



ANEXO II - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “**Alocação de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição Utilizando Colônia de Formigas**” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 22 de Novembro de 2017.

Welton Braga de Souza
Welton Braga de Souza

Resumo

A alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição é uma das alternativas que as empresas utilizam visando reduzir as perdas de energia e manter a tensão nos limites estabelecidos pela ANEEL. Além dessas utilidades, quando esses dispositivos são alocados em paralelo com a carga, trazem outros benefícios como o aumento do fator de potência e a liberação de capacidade do sistema para adição de mais cargas. Esse trabalho implementou três algoritmos para a alocação de banco de capacitores em sistemas de distribuição; sendo uma heurística baseada em índice de sensibilidade de Salam, Chikhani e Hackam (1994), uma heurística baseada em índice de sensibilidade de Elgerd (1971) e a metaheurística Colônia de Formigas, utilizada por Casagrande (2010). Foram realizados testes em sistemas de 10, 33, 135 e 476 barras, e foi possível observar que, ao combinar as heurísticas com o algoritmo de Colônia de Formigas, os resultados encontrados são satisfatórios.

Palavras-Chave: Alocação de Capacitor, Redução de Custos, Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, Colônia de Formigas

Abstract

The allocation of capacitors is one alternative to allow companies reducing losses and keep voltage within the limits established by ANEEL in distribution systems. Whenever those devices are put in parallel to the load, they bring some benefits up such as improving the power factor and increasing the system capacity to admit more loads. This work has implemented three algorithms to deal with the allocation problem in distribution systems: a heuristic based on sensitivity index of Salam, Chikhani e Hackam (1994), a heuristic based on sensitivity index of Elgerd (1971) and the Ant Colony metaheuristic used by Casagrande (2010). The tests were performed on systems with 10, 33, 135 and 476 buses. It was observed that combining one heuristics with Ant Colony, leads to satisfactory result.

Key-words: Capacitor placement, Costs Reduction, Distribution Systems, Ant Colony Optimization

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me sustentado e me guardado em todos os momentos, e que mais essa conquista seja para honra e glória dEle.

Aos meus pais Íris e Walter por estarem sempre presente me apoiando e auxiliando em tudo. Ao meu irmão Douglas e à minha tia Maria Aparecida pelo total apoio e incentivo.

Aos professores que contribuíram para minha formação em especial ao Juan o qual me orientou com muita dedicação para a conclusão deste trabalho.

A todos os meus amigos que me acompanharam neste processo e que estiveram torcendo para que eu pudesse concluir mais esta etapa.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Influência da potência na conexão do capacitor	2
Figura 2 – Aumento do perfil da tensão nas barras	2
Figura 3 – Representação de uma rede de distribuição radial	7
Figura 4 – Modelo II equivalente	8
Figura 5 – Modelo de Curva de duração de Carga	9
Figura 6 – Banco de capacitor chaveado	10
Figura 7 – Conexão do capacitor shunt	11
Figura 8 – Trecho da rede de distribuição	14
Figura 9 – Fluxograma do Método de Varredura	15
Figura 10 – Matriz contendo todas as combinações possíveis para o sistema de 3 barras	16
Figura 11 – Roleta e vetor de probabilidades	19
Figura 12 – Fluxograma da heurística A	20
Figura 13 – Fluxograma da heurística B	21
Figura 14 – Fluxograma de construção das soluções factíveis	22
Figura 15 – Sistema de teste de 10 barras	24
Figura 16 – Formigueiro do sistema de 10 barras	25
Figura 17 – Alocação no sistema de 10 barras	25
Figura 18 – Criação da matriz de feromônio	26
Figura 19 – Matriz de feromônio do sistema de 10 barras	27
Figura 20 – Novo formigueiro gerado	28
Figura 21 – Matriz de feromônio	29
Figura 22 – Verificação da convergência	29
Figura 23 – Matriz de feromônio após a busca de vizinhança	30
Figura 24 – Fluxograma do Colônia de Formigas Modificado	31
Figura 25 – Custos da função objetivo do sistema de 10 barras	35
Figura 26 – Custos da função objetivo do sistema de 33 barras	36
Figura 27 – Custos da função objetivo do sistema de 135 barras	36
Figura 28 – Custos da função objetivo do sistema de 476 barras	37

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações Iniciais	1
1.1.1	Redução das perdas de energia	1
1.1.2	Aumento do fator de potência	1
1.1.3	Melhoria do perfil da tensão	2
1.2	Estado da Arte	3
1.3	Objetivos	6
1.3.1	Objetivos específicos	6
2	MODELAGEM DO PROBLEMA	7
2.1	Linhas de distribuição de energia	8
2.2	Cargas	8
2.2.1	Curva de Duração de Carga	9
2.3	Capacitores	10
2.3.1	Modelagem dos Capacitores	11
2.4	Formulação matemática do problema de alocação de capacitores .	12
3	METODOLOGIA	13
3.1	Fluxo de potência	13
3.1.1	Método de Varredura	13
3.2	Métodos de alocação ótima	16
3.2.1	Alocação de busca exaustiva para o sistema de 10 barras	16
3.2.2	Alocação com Heurísticas	17
3.2.3	Alocação utilizando a metaheurística Colônia de Formigas	23
3.3	Análise descritiva dos resultados	31
4	TESTES E RESULTADOS	33
4.1	Característica dos sistemas	33
4.2	Dados de ajuste dos métodos	34
4.3	Análises dos resultados dos métodos implementados	34
4.3.1	Análise de redução de custos	35
4.3.2	Alocação dos capacitores considerando a moda	37
5	CONCLUSÕES	42
6	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	43

Referências 44

1 Introdução

1.1 Considerações Iniciais

O crescente aumento da demanda do Sistema Elétrico de Potência (SEP) tem se tornado um fator importante para as concessionárias de energia, pois promove um aumento das perdas de energia no sistema e um aumento no desvio da tensão, a qual deve ser mantida nos limites estabelecidos pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) de $\pm 5\%$ da tensão da subestação. Para solucionar esses problemas, as distribuidoras de energia investem em algumas medidas dentre as quais está a alocação de bancos de capacitores. Tais dispositivos, quando conectados em paralelo com a carga, além de reduzirem as perdas no sistema, proporcionam outros benefícios como aumento do fator de potência e uma melhoria do perfil de tensão:

1.1.1 Redução das perdas de energia

Ao alocar um banco de capacitor em paralelo com a carga, ocorre uma diminuição da potência reativa no ponto de instalação, resultando em uma diminuição da corrente reativa. A perda ativa na linha de distribuição ($Perdas_L$) é dada pela Equação (1.1)

$$Perdas_L = R.I^2 \quad (1.1)$$

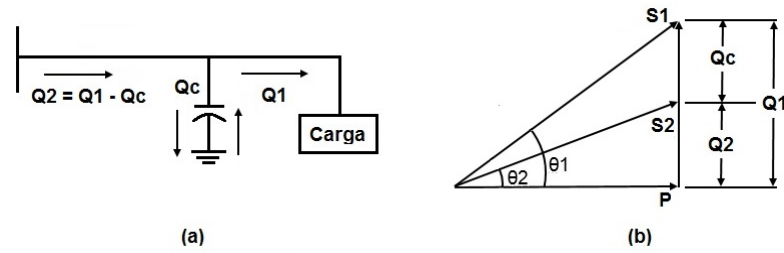
em que R é a resistência da linha e I é a corrente total na linha.

Como a corrente total na linha tem uma parte real e uma parte reativa, a diminuição da corrente reativa resulta na diminuição da perda na linha.

1.1.2 Aumento do fator de potência

A Figura 1(a) - (b) mostra que, ao adicionar um banco de capacitor (Q_c) em shunt com a carga (Q_1), a potência reativa da carga é subtraída da potência reativa do capacitor resultando em uma potência reativa menor (Q_2). Sendo assim, o fator de potência que inicialmente era $\cos(\theta_1)$ aumenta para $\cos(\theta_2)$.

Figura 1 – Influência da potência na conexão do capacitor

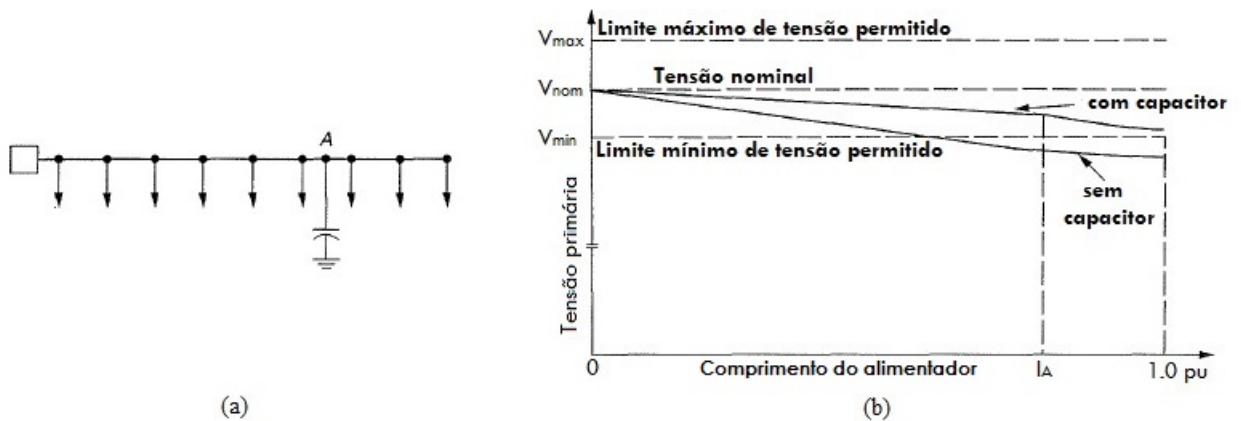


Fonte: Retirado de GÖNEN (2008)

1.1.3 Melhoria do perfil da tensão

Com a alocação dos bancos de capacitores, há uma redução da corrente na linha de distribuição e, conseqüentemente, há uma redução nas quedas de tensão relativas a resistência e a reatância das linhas, melhorando a regulação de tensão. Em GÖNEN (2008), apresenta-se o aumento do perfil da tensão em um alimentador com cargas uniformemente distribuídas após a alocação de um banco de capacitor fixo. A Figura 2(a) representa o alimentador com o banco de capacitor alocado no ponto A. A Figura 2(b) apresenta um gráfico com os valores normalizados de tensão nas barras ao longo do comprimento do alimentador.

Figura 2 – Aumento do perfil da tensão nas barras



Fonte: Retirado de GÖNEN (2008)

Da Figura 2(b), é notório que, após a alocação do banco de capacitor no ponto A do alimentador de distribuição, a tensão das barras aproximam-se do valor nominal. Portanto, há uma melhora no perfil da tensão.

1.2 Estado da Arte

A alocação de bancos de capacitores na rede de distribuição vem sendo estudada desde a década de 50. Inicialmente esses dispositivos eram alocados próximos às subestações. Posteriormente foram sendo instalados próximos às cargas trazendo as vantagens explicadas no capítulo anterior. O problema de alocação de bancos de capacitores no sistema consiste em determinar a capacidade, o tipo e o local onde devem ser alocados de forma a obter um menor custo.

Para a escolha dos melhores locais para alocação de capacitores em uma rede de distribuição, alguns algoritmos envolvendo otimização foram sendo criados ou aprimorados. Esses métodos são divididos em: métodos exatos, heurística e metaheurística.

Segundo Ng, Salama e Chikhani (2000), os métodos exatos consistem em maximizar ou minimizar uma função objetivo sujeita a um conjunto de regras. Duran (1968) aplicou essa metodologia no problema de alocação de capacitores. Ele propõe o método de programação dinâmica que visa determinar o número, localização e os tamanhos ótimos de capacitores shunt em um alimentador de distribuição radial, levando em conta a maximização dos lucros; incluindo o custo dos capacitores. Outros trabalhos foram sendo desenvolvidos como o de Baran e Wu (1989b), o qual trata o problema de alocação de capacitor como uma programação não-linear inteira mista, incluindo as restrições de tensão para diferentes patamares de carregamento.

Outros métodos que serviram de base para muitos trabalhos foram as heurísticas. Segundo Pearl (1984), uma heurística consiste em critérios, métodos ou princípios para decidir o caminho mais eficiente para alcançar o objetivo. Essas regras são fundamentadas em dois princípios: cada critério deve ser simples e capaz de separar corretamente as boas e as más escolhas. Esse método produz estratégias práticas e rápidas as quais reduzem o espaço de busca, podendo chegar em uma solução próxima do valor ótimo. Um dos trabalhos a implementar uma heurística para alocação de capacitores foi o de Salam, Chikhani e Hackam (1994), o qual utilizou um índice de sensibilidade para alocar bancos de capacitores nas barras sensíveis, de modo a obter maior redução nas perdas de energia.

Com o avanço tecnológico e a extensa pesquisa sobre o problema de alocação de capacitores, muitos pesquisadores investiram nas metaheurísticas. Rao (2009) define esses métodos como técnicas que se baseiam em certas características ou comportamentos dos sistemas biológicos, moleculares, sociais e neurobiológicos.

Entre as metaheurísticas existentes, pode-se destacar o Algoritmo Genético (AG), que possui grande aplicabilidade em SEP. Essa técnica baseia-se na teoria de Darwin para os mecanismos de seleção natural e genética, onde os indivíduos mais adaptados

sobrevivem. Boone e Chiang (1993) utilizaram o AG para a determinação da localização e do tamanho dos capacitores. Em seu trabalho, Duque (2013) utiliza a técnica de Busca dos Macacos (Monkey Search) que consiste na análise de como o macaco consegue adquirir alimento em uma selva sem nenhuma informação prévia. Essa técnica permitiu a criação de um método que minimizasse as perdas totais de energia com um mínimo investimento em capacitores, apresentando resultados eficientes e com tempo reduzido de processamento. Uma outra técnica que se baseia na forma como se dá a busca de alimento é a Colônia de Formigas. Ela foca no comportamento cooperativo das colônias de formigas que são capazes de encontrar o menor caminho entre o formigueiro e a fonte de alimento. Essa técnica foi utilizada em Casagrande (2010), gerando resultados satisfatórios.

Os Métodos exatos possuem a vantagem de sempre obter o ótimo global ou local. Porém, possuem a desvantagem de demandar um alto esforço computacional para a obtenção desse ótimo. Já as heurísticas apresentam como vantagem o baixo esforço computacional para se chegar em uma boa solução, mas a desvantagem é que nem sempre essa boa solução é o ótimo. A vantagem da utilização das metaheurísticas é o fato de serem métodos mais robustos, os quais não são atrelados a um problema específico, de forma que possam ser aplicados em muitos problemas de otimização. A desvantagem é a necessidade de configurar um conjunto de parâmetros necessários para o funcionamento da mesma.

Alguns autores desenvolveram combinação de algoritmos como forma de obter melhores resultados. Esses algoritmos são denominados métodos híbridos. Gallego, Monticelli e Romero (2001) criaram um método híbrido envolvendo a metaheurística Busca Tabu com uma heurística baseada em índice de sensibilidade. O método apresentou resultados promissores em relação ao custo e a qualidade nos sistemas testados. Em 2008, Junior (2008) incorporou um índice de sensibilidade baseado em uma função sigmoideal ao problema de fluxo de potência ótimo tornando o problema de programação não linear inteira mista em um problema de programação não linear contínua. Com essa abordagem, este método obteve soluções de boa qualidade com baixo esforço computacional.

A Tabela 1 apresenta um resumo de cada referência citada acima:

Tabela 1 – Métodos implementados para resolver o problema de alocação de capacitores

Tec	Algoritmo / Autor	Sist	Observações
OC	Programação dinâmica. Duran (1968)	-	Ao adicionar o custo dos equipamentos de proteção ao custo de instalação dos capacitores, a solução fornecida pelo algoritmo é mais próxima do cenário real.
	Programação não linear inteira mista. Baran e Wu (1989b)	69	O autor separa o problema em duas etapas: mestre e escravo. Essa abordagem permitiu que o método chegasse aos resultados de uma forma computacionalmente eficiente.
HE	Índice de sensibilidade. Salam, Chikhani e Hackam (1994)	46	A alocação de capacitores permitiu uma compensação reativa de 40,1% da potência reativa total do sistema testado.
ME	Algoritmo genético. Boone e Chiang (1993)	69	Os resultados experimentais revelaram que o algoritmo é capaz de encontrar rapidamente a região do espaço de busca contendo uma solução de boa qualidade para o problema de alocação dos capacitores fixos.
	Colônia de formigas. Casagrande (2010)	14 33 69 476	Com a adição do custo de violação dos limites de tensão, o algoritmo selecionou soluções em que o desvio da tensão foi menor contribuindo de forma que fosse possível conciliar redução de perdas com qualidade no nível de tensão.
	Busca dos macacos. Duque (2013)	33 69 476	Para todos os sistemas testados, de 100 execuções o método chegou na melhor resposta no mínimo 72 vezes.
HI	Índice de sensibilidade e Busca Tabu. Gallego, Monticelli e Romero (2001)	10 69 135	Para o sistema de teste de 135 barras, o método proposto apresentou uma redução do custo em 5% ao alocar os capacitores chaveados.
	Fluxo de Potência Ótimo e índice de sensibilidade. Junior (2008)	14 70	Ao utilizar a função sigmoideal para a modelagem do chaveamento dos bancos associada à uma heurística, o método resultou em um critério de decisão eficiente.
Tec - Técnicas OC - Otimização Clássica HE - Heurística ME - Metaheurística HI - Híbrido Sist - Sistemas de testes			

1.3 Objetivos

Este trabalho visa implementar três algoritmos encontrados na literatura para redução dos custos no sistema de distribuição: duas heurísticas e uma metaheurística. Ao final, apresenta os resultados encontrados para mostrar a eficiência de cada método, trabalhando individualmente ou em conjunto. Em todos os casos, considera-se a alocação de capacitores na rede de distribuição primária.

1.3.1 Objetivos específicos

- Implementar o Fluxo de Potência para sistemas de Distribuição (Varredura Monofásico);
- Implementar a Heurística baseada em índice de sensibilidade de Salam, Chikhani e Hackam (1994);
- Implementar a Heurística baseada em índice de sensibilidade de Elgerd (1971);
- Implementar a metaheurística Colônia de Formigas adaptada por Casagrande (2010);
- Reduzir os custos totais relativos as perdas de energia e a instalação dos bancos de capacitores no sistema de distribuição;
- Analisar os resultados dos sistemas com os métodos individuais e com as heurísticas combinadas com a metaheurística.

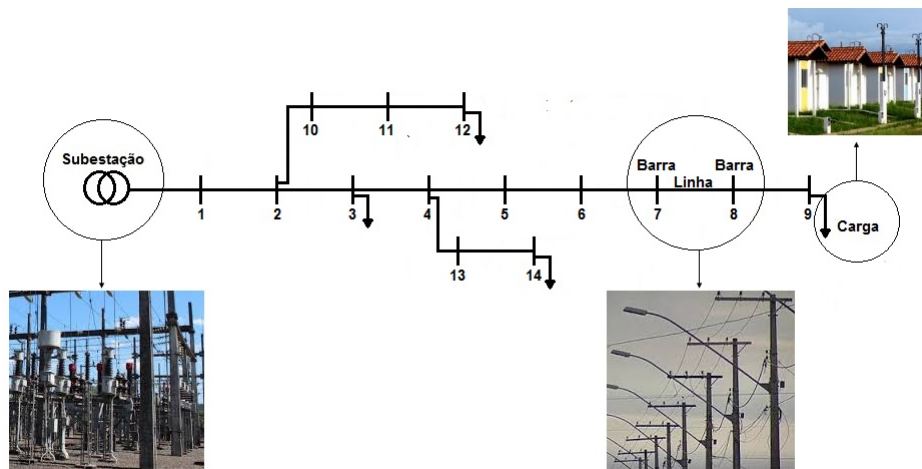
2 Modelagem do problema

Para apresentar a formulação matemática do problema de alocação de capacitores, é necessário modelar alguns componentes da rede de distribuição que serão utilizados.

Segundo Kagan (2010), a finalidade do sistema de distribuição é transportar a energia elétrica proveniente do sistema de transmissão até os consumidores finais sendo estes comerciais, industriais ou residenciais.

As redes de distribuição podem ser construídas de forma radial, fracamente malhada ou malhada. Embora encontram-se essas três topologias de rede, segundo Kersting (2002), grande parte são radiais. Nas redes de distribuição radiais, há um caminho para o fluxo de potência da subestação até os consumidores finais. A Figura 3 representa uma rede de distribuição radial.

Figura 3 – Representação de uma rede de distribuição radial



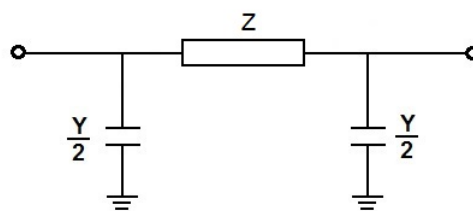
Nesse trabalho, as redes de distribuição são radiais e são representadas pelo equivalente monofásico de um sistema trifásico equilibrado. Nesse contexto, a modelagem dos componentes da rede é realizada a partir dos parâmetros de sequência positiva.

As redes de distribuição são compostas por diversos componentes, dentre os quais estão as linhas, as cargas e os capacitores. A seguir será modelado cada componente citado.

2.1 Linhas de distribuição de energia

Fuchs (1977) descreve a modelagem de três linhas classificando-as como linhas curtas, linhas médias e linhas longas. A classificação é feita com base no comprimento de cada linha. As linhas são lihas de transmissão são representadas com base no modelo π equivalente que consiste em uma impedância em série (Z) e a metade da admitância em cada extremidade ($Y/2$) representando o efeito capacitivo que ocorre entra a linha e a terra como mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Modelo π equivalente



As linhas curtas possuem um comprimento de até 80 km. O comprimento das linhas médias varia entre 80 km e 200 km. As linhas longas possuem um comprimento acima de 200 km.

Short (2004) apresenta dados típicos de redes de distribuição fornecidos pelo Electric Power Research Institute e, dentre esses dados, mostra que o comprimento dos alimentadores de distribuição podem variar de 4 a 25 milhas (6,4 km a 40,2 km). Através desses dados é notório que o comprimento dos alimentadores de distribuição é inferior a 80km. Portanto, as linhas de distribuição são modeladas como linha curta.

Nesse modelo, o efeito capacitivo é muito pequeno e pode ser desconsiderado. Portanto a linha da Figura 4 é representada somente pela impedância em série (Z) que consiste em uma resistência em série com uma reatância indutiva.

2.2 Cargas

No sistema de distribuição, as cargas podem ser representadas por diversos modelos dentre os quais encontram-se os de impedância constante (Z), corrente constante (I), potência constante (P) e híbrido (ZIP , o qual a carga é representada como uma combinação dos modelos de impedância constante, corrente constante e potência constante, como apresentado no trabalho de Kersting (2002)).

Segundo (KAGAN, 2010), nas cargas de impedância constante, a potência absorvida pela carga varia quadraticamente com a tensão a ela aplicada. Nas cargas de corrente

constante, a potência absorvida pela carga varia proporcionalmente à variação da tensão aplicada a mesma. Nas cargas de potência constante, a qual foi utilizada nesse trabalho, as potências ativa e reativa das cargas permanecem constantes em seus valores nominais:

$$\bar{S}_{NF} = S_{NF} \angle \varphi = P_{NF} + jQ_{NF} \quad (2.1)$$

Ao alimentar a carga com uma tensão arbitrária ($V_F \angle \theta$), a corrente (I_F) absorvida pela mesma é inversamente proporcional à tensão aplicada:

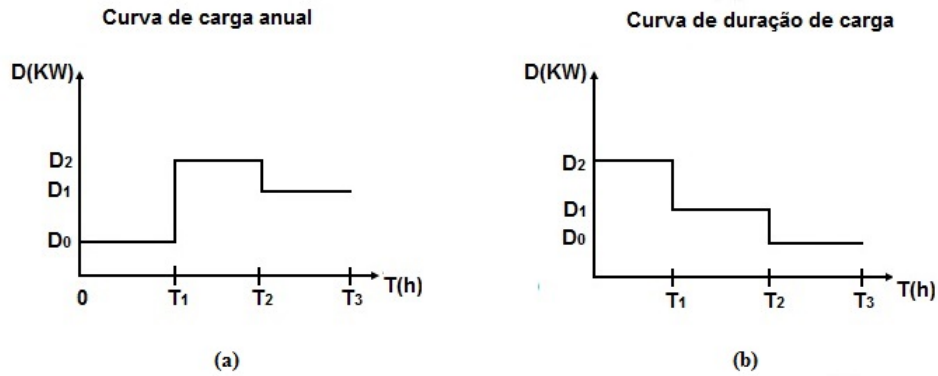
$$\dot{I}_F = \left(\frac{\bar{S}_{NF}}{\dot{V}_F} \right)^* = \frac{S_{NF} \angle -\varphi}{V_F \angle -\theta} = \frac{S_{NF}}{V_F} \angle \theta - \varphi \quad (2.2)$$

Ao se analisar uma carga, deve-se levar em conta o período ao qual a mesma está sendo analisada, pois em um horizonte de 1 ano, por exemplo, o perfil da carga sofre variações. Portanto, é necessário o levantamento da curva de duração da carga que será explicada a seguir.

2.2.1 Curva de Duração de Carga

Segundo Kagan (2010), a curva de carga permite uma visão mais ampla do comportamento da carga. Essa curva pode ser encontrada em forma de curva de duração de carga a qual representa os valores da curva de carga anual ordenados em ordem decrescente no período específico. A Figura 5(b) apresenta uma curva de duração de carga onde cada demanda de carga (D2, D1 e D0) são associadas à um período que essa demanda ocorre (T1, T2 e T0).

Figura 5 – Modelo de Curva de duração de Carga



2.3 Capacitores

Short (2004) define o capacitor como um dispositivo simples capaz de armazenar energia. Esse dispositivo é formado por duas placas metálicas separadas por um material dielétrico. Quando o capacitor é alimentado por uma tensão alternada, há uma forte atração entre as placas metálicas e com isso há um acúmulo de energia. Usualmente, os capacitores são instalados em forma de bancos trifásicos formados a partir da conexão de três ou mais unidades monofásicas. Nos sistemas de distribuição, os bancos de capacitores são utilizados para reduzirem as perdas de energia no sistema e aumentarem o perfil da tensão.

Os bancos de capacitores são divididos em dois tipos: fixos e chaveados. Os bancos fixos permanecem conectados ao sistema com uma capacidade fixa diante de qualquer variação da carga. Os bancos chaveados possuem níveis de capacidade que são ajustados conforme a carga do sistema. A Figura 6 mostra um banco de capacitor chaveado instalado em um poste.

Figura 6 – Banco de capacitor chaveado



Os bancos de capacitores utilizados nas redes primárias para redução de perdas são os capacitores para média tensão; normalizada pela ANEEL (2017) (1kV a 69kV). Esses dispositivos possuem valores de potência reativa pré-definidas pelo fabricante. A Tabela 2 mostra a potência dos capacitores para média tensão da fabricante INEPAR:

Tabela 2 – Capacitores de média tensão da INEPAR

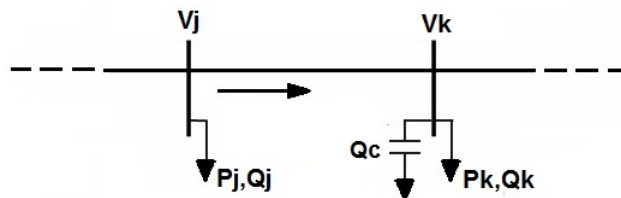
Potência (kVAr)	Tensão Nominal (Vnom)
150	3810 a 7200
	76260 a 14400
	17200 a 24940
200	3810 a 7200
	7620 a 14400
	17200 a 24940
300	3810 a 7200
	7620 a 14400
	17200 a 24940
400	3810 a 7200
	7620 a 14400
	17200 a 24940

Nesse trabalho, os bancos de capacitores utilizados são fixos e possuem uma capacidade de 200kVAr ou 300kVAr.

2.3.1 Modelagem dos Capacitores

Em uma rede de distribuição, os capacitores podem ser conectados de duas formas: (i) em série com a linha ou (ii) em paralelo (shunt) com a carga. Quando conectados em série com a linha, esses dispositivos reduzem a queda de tensão causada pelas reatâncias indutivas e quando conectados em paralelo com a carga, há uma injeção de reativos os quais compensam a corrente reativa requisitada pelas cargas indutivas; reduzindo as perdas. Nesse trabalho, considera-se a conexão shunt dos capacitores. A Figura 7 mostra uma representação dessa conexão onde o capacitor é representado pela potência reativa (Q_C).

Figura 7 – Conexão do capacitor shunt



Os bancos de capacitores fixos são modelados como fonte de potência reativa constante e, ao serem alocados no sistema, esses permanecem constantes diante de qualquer variação da carga.

2.4 Formulação matemática do problema de alocação de capacitores

A modelagem do problema de otimização, utilizada neste trabalho, é a mesma encontrada em (Gallego, Monticelli e Romero (2001), Huang, Yang e Huang (1996) e Baran e Wu (1989b)):

$$\begin{aligned} \min v &= K_e \sum_{p=0}^{n_t} T_p p_p(x^p) + \sum_{k=1}^{n_c} f(u_k^0) \\ \text{s.a. } G^p(x^p, u^p) &= 0; \quad p = 0, 1, 2, \dots, n_t \\ H^p(x^p) &\leq 0; \quad p = 0, 1, 2, \dots, n_t \\ 0 \leq u_k^p &\leq u_k^0; \quad k \in C_1 \end{aligned} \tag{2.3}$$

No modelo da Equação (2.3), a função objetivo é dividida em duas partes, sendo: a primeira parte representa o custo das perdas de energia; sendo n_t o número total de níveis de demanda do sistema ou curva de duração de carga mostrada na Figura 5, K_e o custo da energia em \$/kWh, T_p o tempo de duração de cada nível de demanda p e $p_p(x^p)$ as perdas de potência ativa na rede de distribuição para cada nível de demanda p . O segundo termo da Equação (2.3), representa o custo de instalação dos capacitores nas barras candidatas; sendo n_c o total de barras candidatas à alocação e $f(u_k^0)$ a função do custo que envolve o custo de cada banco de capacitor e capacidade do mesmo (u_k^0).

A função objetivo (2.3) está sujeita às restrições das quais: $G^p(x^p, u^p) = 0$ representa as restrições do fluxo de potência para cada nível de demanda p , $H^p(x^p) \leq 0$ representa as restrições operacionais como limites de tensão nas barras e corrente nas linhas para cada nível de demanda, u_k^0 representa a capacidade do banco de capacitor que pode ser alocado na barra k e u_k^p representa o nível da capacidade do capacitor alocado na barra k para uma demanda p . C_1 são barras candidatas para alocação de bancos fixos.

Nesse custo de instalação os capacitores fixos, são representados pela Equação (2.4)

$$u^0 = u^1 = \dots u^{n_t} \tag{2.4}$$

3 Metodologia

O problema de alocação de capacitores apresentado no Capítulo 2 é complexo e discreto. Portanto, deve ser resolvido usando técnicas de otimização. Nesse trabalho, será utilizada uma metaheurística associada aos resultados obtidos através de dois métodos heurísticos.

Para resolver as restrições do problema da Equação (2.3), é preciso avaliar o fluxo de potência:

3.1 Fluxo de potência

Segundo Monticelli (1983), o cálculo do fluxo de potência (FP) em uma rede é realizado para determinar o estado das tensões e dos ângulos em cada barra, da distribuição dos fluxos e de outras grandezas de interesse.

Para o cálculo do FP em sistemas de distribuição com topologia radial, existem diversos métodos eficazes: Método de Baran-Wu proposto por Baran e Wu (1989a), Método de Soma de Potências proposto por G. (1990), Método de Goswami-Basu proposto por Goswami e Basu (1992) e o Método de Varredura proposto por Shirmohammadi et al. (1988).

Dentre os métodos citados, este trabalho utilizou o Método de Varredura, pois, apresenta uma lógica de programação simples.

3.1.1 Método de Varredura

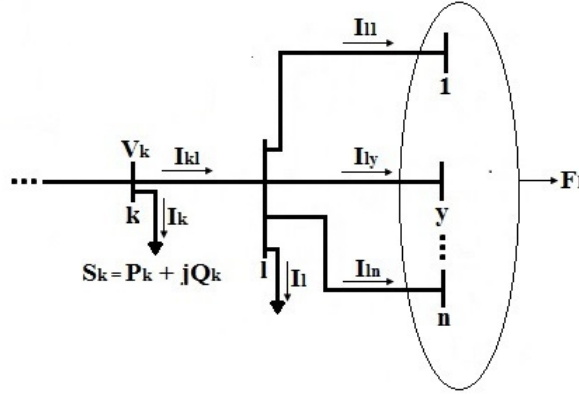
No Método de Varredura, o cálculo do FP é dividido em duas principais etapas: Varredura Reversa (Backward), a qual atualiza, em cada iteração, a corrente nas linhas e Varredura Direta (Forward), a qual atualiza, em cada iteração, as tensões nas barras. O cálculo é repetido enquanto a diferença das tensões entre duas iterações estiverem acima de uma tolerância pré-estabelecida.

O algoritmo de Varredura foi implementado de acordo com os seguintes passos:

- 1º passo: Ordena-se as barras do sistema renumerando-as, iniciando na subestação e finalizando nas barras terminais, Kagan (2010);
- 2º passo: Inicializam-se todas as barras com o valor de tensão da subestação;

- 3º passo (Varredura Reversa - Backward): na varredura reversa, o cálculo é realizado a partir das barras terminais até a subestação. A Figura 8 representa um trecho da rede de distribuição:

Figura 8 – Trecho da rede de distribuição



Pela Equação (3.1), calculam-se as correntes devido às cargas do sistema. Por exemplo, para a barra k da Figura 8

$$I_k = \left(\frac{S_k}{V_k} \right)^* = \left(\frac{P_k + jQ_k}{V_k} \right)^* \quad (3.1)$$

em que I_k é a corrente da carga da barra k, S_k é potência da carga conectada à barra k e V_k a tensão na barra k.

Após encontrar as correntes devido às cargas de todas as barras, calcula-se a corrente em cada linha. Por exemplo, para a linha kl da Figura 8, utiliza-se a Equação (3.2).

$$I_{kl} = I_l + \sum_{y \in F_l}^n I_{ly} \quad (3.2)$$

em que I_l é a corrente de carga da barra l, F_l é o conjunto de barras a jusante da barra l e conectadas à mesma e I_{ly} são as correntes nas linhas conectadas à barra l.

- 4º passo (Varredura Direta - Forward): A partir dos valores de corrente nas linhas, inicia-se o processo do cálculo direto que consiste em recalculer as tensões nas barras partindo da subestação até as barras terminais. Com relação à Figura 8, a Equação (3.3) mostra o cálculo da tensão na barra l, que está a jusante da barra k.

$$V_l = V_k - I_{kl} \cdot Z_{kl} \quad (3.3)$$

Em que Z_{kl} é a impedância da linha kl.

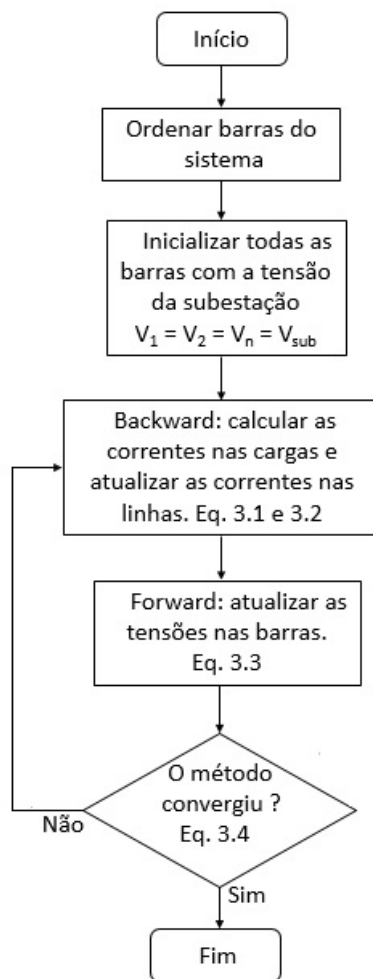
- 5º passo: Após o cálculo das tensões, há uma verificação do critério de convergência que consiste na subtração entre o módulo das tensões de cada barra da iteração atual com as tensões de cada barra da iteração anterior como pode ser visto na Equação (3.4).

$$|V_k^{iter} - V_k^{iter-1}| < \tau \text{ para } k = 1, 2, \dots, Nbarras \quad (3.4)$$

Para a convergência do algoritmo, essa subtração deve ser menor do que a tolerância pré-estabelecida τ . Se o sistema não convergir, o processo retorna ao 3º passo.

A Figura 9 mostra um fluxograma contendo as etapas do algoritmo de varredura.

Figura 9 – Fluxograma do Método de Varredura



3.2 Métodos de alocação ótima

3.2.1 Alocação de busca exaustiva para o sistema de 10 barras

O algoritmo de busca exaustiva ou força bruta consiste em construir uma matriz com todas as combinações de alocação dos bancos de capacitores no sistema e encontrar o menor valor da função objetivo de custo, ou seja, o algoritmo encontra o ótimo global.

Esse método foi implementado somente para o sistema de 10 barras devido a limitação da memória do Matlab. A seguir será explicada a construção do algoritmo força bruta:

Primeiramente é realizado um cálculo de todas as possíveis combinações: É um sistema de 10 barras e em cada posição podem ser alocados até 3 bancos capacitores podendo não ser alocado nenhum também. Portanto, para cada posição, existem 4 possibilidades de alocação: 0, 1, 2 ou 3. Sendo assim, têm-se $4^{10} = 1048576$ que são todas as combinações de alocação para este caso. Portanto, constrói-se uma matriz de dimensão 1048576×10 ; 1048576 linhas e 10 colunas.

Para exemplificar o algoritmo, considera-se um sistema um sistema de 3 barras e com a alocação de no máximo 1 banco de capacitor, ou seja, com possibilidades 0 e 1 de alocação. Para esse sistema é criada uma matriz de $2^3 = 8$ linhas e 3 colunas que mostra todas as possíveis combinações ilustrada na Figura 10.

Figura 10 – Matriz contendo todas as combinações possíveis para o sistema de 3 barras

		Barras		
		1	2	3
Combinações	1	0	0	0
	2	0	0	1
	3	0	1	0
	4	0	1	1
	5	1	0	0
	6	1	0	1
	7	1	1	0
	8	1	1	1

3.2.2 Alocação com Heurísticas

- Heurística A

A heurística A utiliza o índice de sensibilidade proposto por Salam, Chikhani e Hackam (1994). Essa heurística utiliza o índice para selecionar algumas barras para a alocação dos capacitores, denominadas barras sensíveis. A seguir serão mostradas as equações do método implementado:

O total de perdas de potência ativa da rede de distribuição é calculado pela Equação (3.5).

$$P_L = \sum_{i=1}^M I_i^2 \cdot r_i = \sum_{i=1}^M (I_{ai}^2 \cdot r_i + I_{ri}^2 \cdot r_i) \quad (3.5)$$

em que M é o número total de linhas do sistema, I_i é a corrente que flui pela linha i. Essa corrente tem uma componente real (I_{ai}) e uma componente imaginária (I_{ri}) e r_i é a resistência da linha i.

Como a compensação pelo capacitor afeta somente a componente imaginária da corrente (I_{ri}) da Equação (3.5), serão analisadas somente as perdas causadas por essa componente. Portanto, a equação será:

$$P_{rL} = \sum_{i=1}^M I_{ri}^2 \cdot r_i \quad (3.6)$$

Para uma rede de distribuição radial, a corrente na linha é a soma das correntes de todas as barras a jusante dessa linha. Sendo assim, a parte imaginária da corrente na linha pode ser representada pela Equação (3.7).

$$I_{ri} = \sum_{l \in W_i} I_{dl} \quad (3.7)$$

Em que W_i representa o conjunto de todas as barras de carga a jusante da linha i e I_{dl} corresponde a parte imaginária das correntes nessas barras. Substituindo a Equação (3.7) na Equação (3.6), têm-se uma equação geral para as perdas ativas no sistema relativas à parte imaginária da corrente:

$$P_{rL} = \sum_{i=1}^M r_i \cdot \left(\sum_{l \in W_i} I_{dl} \right)^2 \quad (3.8)$$

Para encontrar as perdas ativas em cada linha, utiliza-se a seguinte representação matricial:

$$VetP_{rL} = [r]^T \cdot ([A] \cdot [I_d])^2 \quad (3.9)$$

Em que:

$VetP_{rL}$ - é um vetor contendo as perdas ativas nas linhas referentes à parte imaginária da corrente;

$[r]$ - é uma matriz diagonal contendo a resistência de cada linha;

$[A]$ - é uma matriz de incidência do sistema que será explicada no próximo tópico;

$[I_d]$ - é um vetor contendo a parte imaginária das correntes nas cargas.

– **Matriz de incidência [A]**

É uma matriz de dimensão (m x w) onde m corresponde ao total de linhas do sistema e w o total de barras:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1w} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2w} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mw} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Na matriz A, a_{il} é um elemento que está na i-ésima linha e l-ésima coluna. Portanto, $a_{il} = 1$ se a barra l estiver a jusante da linha i e $a_{il} = 0$ caso contrário.

Após a obtenção das perdas em todas as linhas do sistema, encontra-se a linha que contém a maior perda pela operação Max.

$$P_{rLh} = MAX_{i=1}^M \{VetP_{rLi}\}$$

em que h é a linha que contém a maior perda.

A maior perda pode ser representada pela seguinte equação:

$$P_{rLh} = r_h \cdot \left(\sum_{l \in W_h} I_{dl} \right)^2 \quad (3.11)$$

em que W_h representa o conjunto de todas as barras que estão a jusante da linha de maior perda h, r_h representa a resistência da linha h e I_{dl} representa as

correntes das cargas a jusante da linha h.

Para definir a barra sensível, ou seja, a barra a qual o capacitor será alocado, o algoritmo possui dois métodos diferentes. O primeiro é baseado em um vetor de probabilidades onde cada probabilidade ($ProbA_l$) é calculada a partir do vetor de correntes, como mostrado na Equação (3.12):

$$ProbA_y = \frac{[VetI_{dl}]}{\sum VetI_{dl}} \quad (3.12)$$

em que $VetI_{dl}$ é o vetor da parte imaginária das correntes nas barras a jusante da linha de maior perda, $[VetI_{dl}]$ é a corrente na barra y na qual será calculada a probabilidade e $\sum I_{dl}$ é a soma de todas as correntes do vetor $VetI_{dl}$

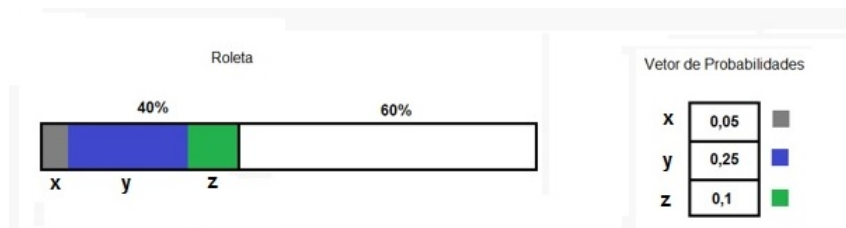
O outro método consiste em encontrar, dentre as correntes do vetor $VetI_{dl}$, qual barra possui a maior corrente (I_{dx}), a alocação do capacitor será nessa barra que é definida como barra sensível.

$$I_{dx} = MAX_{l \in W_h} \{I_{dl}\}$$

Para a escolha do método, utiliza-se uma roleta de probabilidades (a porcentagem de escolha do método a ser utilizado definida foi de 40% para o primeiro método e 60% para o segundo). Primeiramente sorteia-se um número entre 0 e 1. Caso o número seja menor ou igual a 0.4, utiliza-se o primeiro método. Para esse caso somam-se as probabilidades de cada posição do vetor até que a soma seja maior ou igual ao valor sorteado. Quando essa condição for atingida, a barra será denominada barra sensível. Caso o número seja maior do que 0.4, utiliza-se o segundo método.

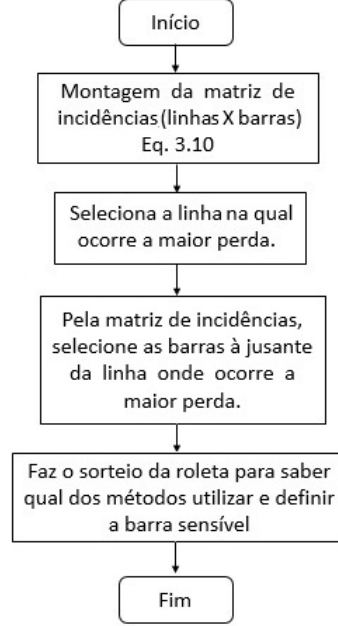
A Figura 11 mostra um exemplo de uma roleta e do vetor de probabilidades criado a partir das correntes nas barras x,y e z as quais estão a jusante da linha de maior perda. Se o sorteio indicar 0.20, então pela roleta será utilizado o primeiro método. Como a probabilidade da barra x é inferior a 0.2 então soma-se a mesma à probabilidade da barra y totalizando 0.30. Portanto a barra sensível será a barra y.

Figura 11 – Roleta e vetor de probabilidades



A Figura 12 resume as etapas da heurística:

Figura 12 – Fluxograma da heurística A



- Heurística B

Para o critério de alocação da heurística B, foi utilizado um índice de sensibilidade desenvolvido no trabalho de Elgerd (1971) para encontrar as barras sensíveis do sistema.

A Equação (3.13), expressa o total das perdas da rede em termos das potências (P_k, P_l, Q_k, Q_l) e das tensões ($V_k \angle \delta_k, V_l \angle \delta_l$) nas barras k e l:

$$P_{rede} = \sum_{k=1}^W \sum_{l=1}^W \alpha_{kl} (P_k P_l + Q_k Q_l) + \beta_{kl} (Q_k P_l - P_k Q_l) \quad (3.13)$$

em que $\alpha_{kl} = \frac{r_{kl}}{|V_k||V_l|} \cos(\delta_k - \delta_l)$, $\beta_{kl} = \frac{r_{kl}}{|V_k||V_l|} \sin(\delta_k - \delta_l)$, W é o total de barras do sistema e r_{kl} é a resistência na linha kl.

Para mensurar o impacto em uma barra quando ocorre uma mudança de injeção de reativos na mesma, utiliza-se a Equação (3.14); a qual consiste no índice de sensibilidade utilizado:

$$\frac{\partial P_{rede}}{\partial Q_k} = 2 \sum_{l=1}^W (\alpha_{kl} Q_l + \beta_{kl} P_l) \quad (3.14)$$

Após calcular o índice de sensibilidade, para escolher a barra sensível utiliza-se dois métodos assim como na heurística A. No primeiro método, o vetor de

probabilidades (ProbB) é calculado a partir do vetor de índices das barras, como mostrado na Equação (3.15).

$$ProbB_l = \frac{[VetIndex]}{\sum VetIndex} \quad (3.15)$$

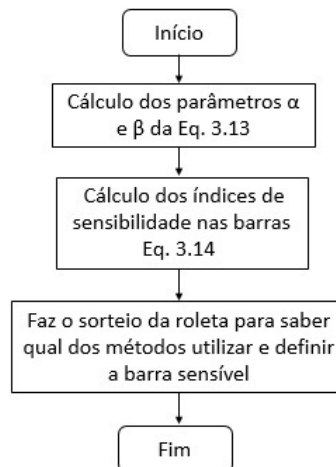
em que $[VetIndex]$ é o índice de sensibilidade na barra l e $\sum VetIndex$ é a soma de todos os índices do vetor $VetIndex$

O segundo método consiste em encontrar o maior índice de sensibilidade do vetor. Caso tenham dois ou mais valores iguais, seleciona-se o primeiro.

A escolha de cada método é feita com base na mesma roleta explicada na heurística A, sendo 40% para o primeiro método e 60% para o segundo.

A Figura 13 apresenta as etapas da heurística implementada.

Figura 13 – Fluxograma da heurística B



- Construção das soluções factíveis

Na alocação de capacitores fixos, primeiramente define-se os parâmetros do sistema os quais são apresentados na Tabela 3

Tabela 3 – Parâmetros de entrada das heurísticas

Parâmetros	Descrição
Quantidade de execuções (qexec)	Máximo de execuções do algoritmo
Níveis de demanda (nivelD)	Demanda de carga para cada intervalo de tempo
Número máximo de bancos de capacitores (ncapMAX)	Quantidade máxima de bancos de capacitores que podem ser alocados nas barras
Capacidade dos bancos de capacitores (potcap)	Potência dos bancos em kVAR
Custo da potência reativa instalada (CMVAR)	Custo dos bancos de capacitores (\$/MVar)
Custo da energia (Cenerg)	Custo das perdas de energia para cada nível de demanda (\$/kWh)
Tempo de operação do sistema (tOP)	Tempo de duração de cada nível de demanda (h)
Limites de tensão (limiteV)	Limites estabelecidos para a tensão

Em seguida, utiliza-se o método de varredura para conhecer as características do sistema (perdas ativas, tensão nas barras e corrente nas linhas).

Na sequência, a Heurística A ou a Heurística B são utilizadas para indicação das barras sensíveis; o algoritmo seleciona a primeira melhor solução factível obtida e aloca um capacitor na barra sensível.

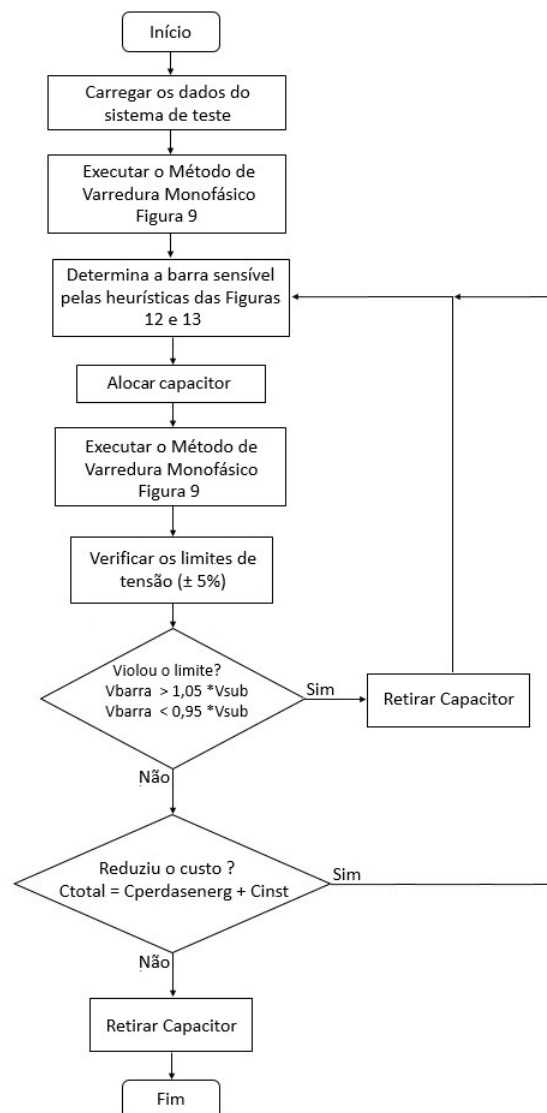
Após a alocação, obtêm-se as tensões nas barras pelo método de varredura. Essas tensões devem estar dentro do limite de tensão pré-estabelecido.

Caso haja uma violação dos limites de tensão, o capacitor é retirado da barra sensível e alocado na próxima barra sensível encontrada.

Caso não ocorra uma violação, verifica-se a função objetivo para saber se houve uma redução dos custos. Se houver redução, aloca-se capacitor na próxima barra sensível. Se não houver redução, retira-se o capacitor e finaliza-se o método.

O fluxograma abaixo apresenta as etapas da alocação detalhadamente.

Figura 14 – Fluxograma de construção das soluções factíveis



3.2.3 Alocação utilizando a metaheurística Colônia de Formigas

Segundo Bonabeau, Dorigo e Theraulaz (1999), os insetos sociais como abelhas, formigas, vespas e cupins, possuem um grande sistema organização onde os indivíduos são separados por castas como rainha, soldados, operários, etc. Além da separação por castas, no caso das formigas existe uma divisão de trabalho: umas trabalham cortando folhas, outras transportam as folhas até o formigueiro e algumas protegem o ninho.

Um outro aspecto interessante observado nas colônias de insetos é a capacidade de auto-organização. As formigas por exemplo, possuem um processo denominado forrageamento. Em seu trabalho, Lucia (1993) define esse processo como sendo o comportamento que as formigas apresentam na busca e no transporte do alimento até o formigueiro.

As formigas operárias ao encontrarem a fonte de alimento, retornam ao formigueiro transportando o alimento e vão marcando a trilha por onde passam com um odor típico de sua colônia. Através dessas trilhas, as outras formigas vão se orientando através do feromônio. Após um determinado período, todas as formigas passarão pelo único caminho o qual tem a maior concentração de feromônio, esse caminho é o menor percurso entre a fonte de alimento e o formigueiro, Bonabeau, Dorigo e Theraulaz (1999).

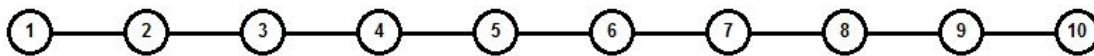
Baseado nesse comportamento das formigas, Dorigo, Maniezzo e Colorni (1996) propôs uma metaheurística denominada Colônia de Formigas para resolver os problemas difíceis de otimização combinatória. Primeiramente, o algoritmo foi aplicado ao Problema do Caxeiro Viajante. Posteriormente, essa técnica foi utilizada em alguns trabalhos como (Annaluru, Das e Pahwa (2004), Filho, Lacerda e Junior () e Casagrande (2010)) para resolver o problema de alocação de capacitores diminuindo as perdas de energia no sistema de distribuição.

Esse trabalho implementa o algoritmo Colônia de Formigas modificado, proposto por Casagrande (2010), o qual modificou o algoritmo Colônia de Formigas original proposto por Dorigo, Maniezzo e Colorni (1996) tornando o método mais eficiente.

O Algoritmo original consiste basicamente em: (i) definir os parâmetros de entrada, (ii) inicializar o formigueiro, (iii) calcular a função objetivo para cada formiga, (iv) analisar as soluções, (v) construir a matriz de feromônio, (vi) sortear um novo formigueiro e (vii) analisar a convergência. Casagrande (2010) acrescentou ao método original a evaporação do feromônio, proposta por Bonabeau, Dorigo e Theraulaz (1999) e a busca de vizinhança a qual é semelhante ao *branch exchange*; proposto por Civanlar et al. (1988).

Para explicar as etapas do algoritmo, será feito um exemplo com o sistema de teste de 10 barras, mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Sistema de teste de 10 barras



- Definição dos parâmetros

A Tabela 4 apresenta os parâmetros iniciais necessários para a execução do algoritmo:

Tabela 4 – Parâmetros do algoritmo Colônia de Formigas

Parâmetros	Descrição
Número de formigas (nF)	Total de soluções do algoritmo
Quantidade de execuções (qexec)	Total de execuções do algoritmo
Níveis de demanda (nivelD)	Demanda de carga para cada intervalo de tempo
Taxa de evaporação do feromônio (taxaEvap)	Porcentagem de decrementado do feromônio será em cada iteração
Número máximo de bancos de capacitores (ncapMAX)	Quantidade de bancos de capacitores que podem ser alocados nas barras
Capacidade dos bancos de capacitores (potcap)	Potência dos bancos em kVAR
Percentual de barras que receberão a alocação de capacitor (pctBarras)	Quantidade de barras que podem receber a alocação de bancos capacitores
Custo da potência reativa instalada (CMVAR)	Custo dos bancos de capacitores (\$/MVar)
Custo da energia (Cenerg)	Custo das perdas de energia para cada nível de demanda (\$/kWh)
Tempo de operação do sistema (tOP)	Tempo de duração de cada nível de demanda (h)
Limites de tensão (limiteV)	Limites estabelecidos para a violação de tensão (%)

Para o exemplo de 10 barras, os parâmetros definidos serão: $qexec = 1$, $nivelD = [1.1 \ 0.6 \ 0.3]$, $nF = 3$, $taxaEvap = 0.2$, $ncapMAX = 3$, $pctBarras = 0.4$, $potcap = 300$ kVar, $CMVAR = 4900$ \$/MVar, $Cenerg = 0.06$ \$/kWh para todos os 3 níveis de demanda, $tOP = [1000 \ 6760 \ 1000]$, $limiteV = 5\%$.

- Inicialização do formigueiro

Uma formiga consiste em um vetor de tamanho correspondente ao número de barras dos sistema de teste. Pelo exemplo de 10 barras, têm-se um vetor de 10 posições. Para o preenchimento da formiga, seleciona-se aleatoriamente o número de barras que receberão a alocação de capacitores dentro do percentual informado (de 0 a $pctBarras = 0.4$). Sendo assim, em uma formiga, no máximo 4 barras receberão alocação de capacitores.

Em seguida, seleciona-se aleatoriamente uma barra e o número de capacitores que essa barra receberá podendo ser de 0 até o valor máximo permitido por barra ($ncapMAX = 3$). Esse procedimento é repetido até preencher o total de barras que receberão a alocação de capacitores.

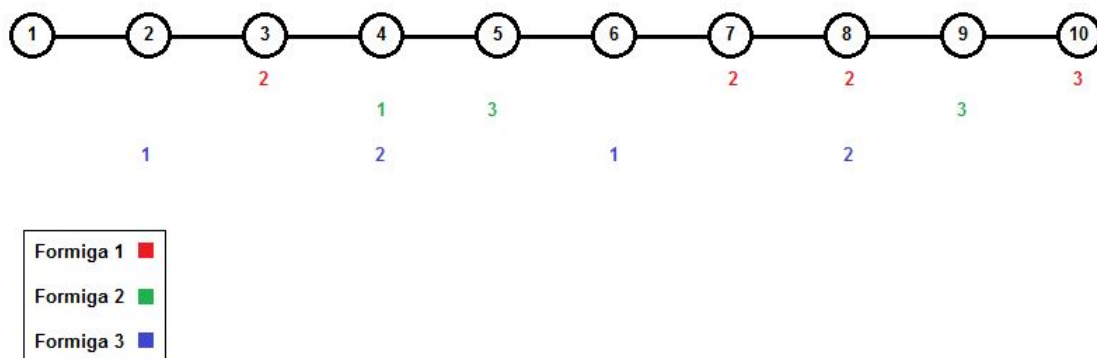
Após o preenchimento da primeira formiga, inicia-se o sorteio da próxima e o processo se repete até atingir o número total de formigas do formigueiro ($nF = 3$). A Figura 16 mostra o formigueiro completo para esse exemplo.

Figura 16 – Formigueiro do sistema de 10 barras

	Total de barras do sistema									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Formiga 1	0	0	2	0	0	0	2	2	0	3
Formiga 2	0	0	0	1	3	0	0	0	3	0
Formiga 3	0	1	0	2	0	1	0	2	0	0

A Formiga 1 da Figura 16 apresenta a solução sorteada: foram alocados 2 bancos de capacitores na barra 3, 2 bancos na barra 7, 2 bancos na barra 8 e 3 bancos na barra 10. A Figura 17 apresenta as alocações dos bancos de capacitores das 3 formigas no sistema de 10 barras.

Figura 17 – Alocação no sistema de 10 barras



- Cálculo da função objetivo

Após a construção do formigueiro, utiliza-se o método de Varredura monofásico para a obtenção das perdas para o caso base (sem capacitor), e para cada uma das formigas. Em seguida, calcula-se a função objetivo (Equação (2.3)) para cada caso. A Tabela 5 apresenta os resultados encontrados para o exemplo do sistema de 10 barras:

Tabela 5 – Valores da função objetivo para o sistema de 10 barras

Casos	Valor da FObjetivo
Caso base	329040
Formiga 1	328320
Formiga 2	313670
Formiga 3	314990

- Análise das soluções

A partir dos resultados da Tabela 5, seleciona-se o melhor valor da função objetivo, ou seja, o menor valor. Para o exemplo em questão, será selecionada a Formiga 2, a qual apresentou o menor custo: \$ 313670. Por ser a melhor solução dentre as demais, a Formiga 2 é denominada solução rainha e é armazenada para ser utilizada nas iterações posteriores. As alocações referentes à solução rainha (Formiga 2), encontram-se Figura 17.

- Construção da matriz de feromônio

Biologicamente, as formigas se orientam pelo feromônio de forma a encontrar o menor caminho entre o formigueiro e o alimento, como explicado anteriormente.

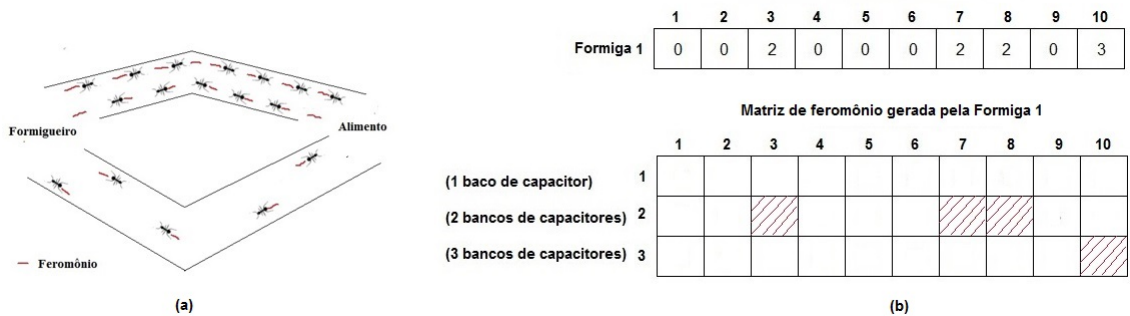
Assim como o feromônio ajuda as formigas a se orientarem pelo melhor caminho, no algoritmo, cada formiga é associada a um depósito de feromônio, pela Equação (3.16), que representa um número relacionado à qualidade da solução. Dessa forma, as soluções dos formigueiros posteriores tenderão a chegar em resultados com boas qualidades.

$$QF_k = \frac{1}{(Fob_k - Me + 1).100} \quad (3.16)$$

em que QF_k é a quantidade de feromônio depositada pela formiga k, ou seja, associada à solução k. Fob_k é a função objetivo calculada pela formiga k e Me é o menor valor da função objetivo na iteração corrente, ou seja, valor da solução rainha.

As linhas da matriz de feromônio correspondem ao número de banco de capacitores que podem ser alocados nas barras e as colunas da matriz correspondem às barras do sistema. A Figura 18(a) mostra a parte biológica da ação do feromônio, em que as formigas passam pelo menor caminho juntamente com a matriz de feromônio criada para o exemplo do sistema de 10 barras (18(b)).

Figura 18 – Criação da matriz de feromônio



A matriz de feromônio da Figura 18(b) representa as posições onde a quantidade de feromônio QF_k , relativa à solução da Formiga 1, foi depositada. O cálculo é feito para cada formiga e a matriz é acumulativa durante todo o processo, como mostrado pela Equação (3.17). Esta etapa faz com que o próximo formigueiro tenha uma quantidade maior de boas soluções.

$$MF_i = MF_{i-1} + \delta MF_i \quad (3.17)$$

em que MF_i é o total de feromônio da iteração atual (i) de uma determinada posição da matriz de feromônios, MF_{i-1} é o total de feromônio da iteração anterior (i-1) de uma determinada posição da matriz de feromônios e δMF_i é o depósito de feromônio na posição da matriz de feromônios realizado por todas as formigas na iteração i. A Figura 19 mostra a matriz de feromônio total gerada para o formigueiro da Figura 16

Figura 19 – Matriz de feromônio do sistema de 10 barras

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0.8e-05	0	0.1e-01	0	0.8e-05	0	0	0	0
2	0	0	0.7e-06	0.8e-05	0	0	0.7e-06	0.8e-05	0	0
3	0	0	0	0	0.1e-01	0	0	0	0.1e-01	0.7e-06

- Sorteio do novo formigueiro

Nessa etapa, gera-se um novo formigueiro com algumas características do formigueiro anterior. Nesse formigueiro, uma das formigas é a solução rainha encontrada no formigueiro anterior e as outras formigas são preenchidas com base em uma roleta semelhante à roleta utilizada nas heurísticas A e B:

A roleta é separada em duas partes: uma parte corresponde ao sorteio totalmente aleatório da formiga, como feito para o formigueiro inicial; e a outra parte corresponde a um sorteio baseado em uma matriz de probabilidades.

A matriz de probabilidades é gerada a partir da matriz de feromônio e o elemento da matriz de probabilidades ($P_{a,b}$) é calculado pela Equação (3.18).

$$P_{a,b} = \frac{[MF_{a,b}]}{\sum MF} \quad (3.18)$$

em que a corresponde às linhas da matriz de feromônio, b corresponde às colunas da matriz de feromônio, $[MF_{a,b}]$ é o valor do feromônio relativo a posição (a,b) da

matriz de feromônio e $\sum MF$ é a soma de todos os valores dos feromônios da matriz de feromônio.

A Figura 20 apresenta o novo formigueiro gerado. É notório também que o formigueiro atual apresenta a característica do formigueiro anterior que é a Formiga 2; atual solução rainha.

Figura 20 – Novo formigueiro gerado

Formigueiro Atual										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Formiga 1	0	2	0	0	3	0	1	0	0	3
Formiga 2	0	0	0	1	3	0	0	0	3	0
Formiga 3	1	3	0	0	0	0	3	2	0	0

Formigueiro Anterior										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Formiga 1	0	0	2	0	0	0	2	2	0	3
Formiga 2	0	0	0	1	3	0	0	0	3	0
Formiga 3	0	1	0	2	0	1	0	2	0	0

- Evaporação do feromônio

Após a geração do novo formigueiro ocorre uma evaporação do feromônio para que não haja um acúmulo de soluções ruins. A Equação (3.19) representa o processo de evaporação que consiste em diminuir os valores dos feromônios depositados na matriz de feromônios por um fator ρ .

$$MF = (1 - \rho)MF \quad (3.19)$$

em que ρ corresponde à porcentagem de feromônio evaporada, variando entre $[0,1]$.

Em seu trabalho, Talbi (2009) menciona três tipos de atualizações do feromônio: atualização online passo a passo, atualização atrasada e a atualização offline. Nesse trabalho foi utilizada a atualização offline em que a matriz de feromônios é decrementada em cada iteração após a geração do novo formigueiro completo.

Para o sistema de 10 barras, ρ foi definido com sendo 0.2. Portanto, a evaporação da matriz de feromônio da Figura 19, resulta na matriz de feromônio da Figura 21.

Figura 21 – Matriz de feromônio

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0.6e-05	0	0.8e-03	0	0.6e-05	0	0	0	0
2	0	0	0.5e-06	0.6e-05	0	0	0.5e-06	0.7e-05	0	0
3	0	0	0	0	0.8e-03	0	0	0	0.8e-03	0.5e-06

- Análise de convergência

A convergência do algoritmo é atingida quando a solução rainha obtiver pelo menos 90% da quantidade total do feromônio. Para o cálculo dessa quantidade utiliza-se a Equação (3.20)

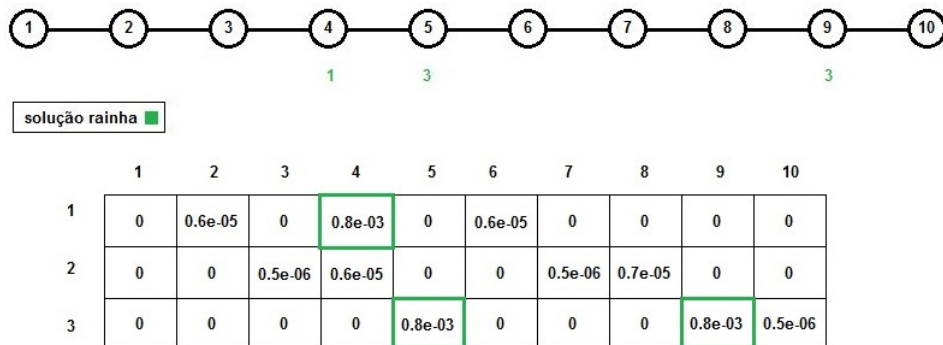
$$QFrainha = \frac{\sum MF_{rainha}}{\sum MF_{total}} \quad (3.20)$$

em que $QFrainha$ é a quantidade de feromônio em porcentagem relativa às alocações da rainha em relação ao total de feromônios, $\sum MF_{rainha}$ é a soma de todos os valores dos feromônios correspondentes às alocações da rainha e $\sum MF_{total}$ é a soma de todos os valores da matriz de feromônios.

Quando essa convergência é atingida pela primeira vez, o processo não finaliza, pois há uma etapa posterior a qual consiste em uma busca de vizinhança. Dessa forma, o processo termina somente quando a convergência é atingida pela segunda vez.

A Figura 22 apresenta a alocação da solução rainha juntamente com a matriz de feromônio com destaque nas posições referentes a solução rainha.

Figura 22 – Verificação da convergência



Ao aplicar a Equação (3.20) para este caso, $QFrainha = 0.9989$. Sendo assim, a convergência foi atingida pela primeira vez e será realizada a busca de vizinhança.

- Busca de vizinhança

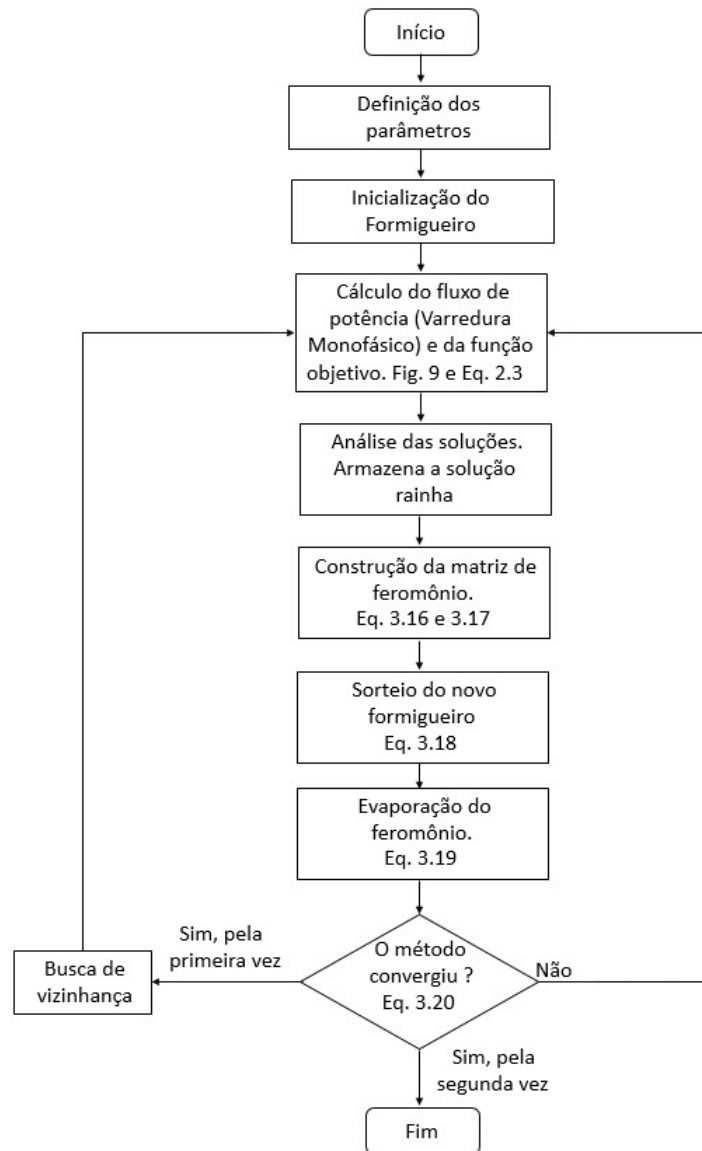
Na busca de vizinhança, as posições da matriz de feromônio em torno das posições correspondentes à solução rainha recebem o mesmo valor de feromônio da solução rainha. A Figura 23 apresenta a matriz de feromônio atualizada após a busca de vizinhança. Essa abordagem permite que os capacitores sejam alocados próximos às barras da solução rainha.

Figura 23 – Matriz de feromônio após a busca de vizinhança

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0.6e-05	0.8e-03	0.8e-03	0.8e-03	0.6e-05	0	0	0	0
2	0	0	0.8e-03	0.8e-03	0.8e-03	0.8e-03	0.5e-06	0.8e-03	0.8e-03	0.8e-03
3	0	0	0	0.8e-03	0.8e-03	0.8e-03	0	0.8e-03	0.8e-03	0.8e-03

Após a busca de vizinhança, o algoritmo retorna à etapa do cálculo do fluxo de potência e continua a execução até que seja atingida uma segunda convergência. A Figura 24 apresenta as etapas da metaheurística implementada.

Figura 24 – Fluxograma do Colônia de Formigas Modificado



Fonte: Adaptado de Casagrande (2010)

3.3 Análise descritiva dos resultados

Por serem métodos que possuem um componente aleatório, ou seja, apresentam diferentes resultados para cada execução, para a obtenção dos resultados das heurísticas A e B e do Colônia de Formigas, faz-se necessária a utilização da média aritmética, da moda e do número de ocorrências da moda, os quais permitem analisar um conjunto de resultados. A seguir serão apresentados os conceitos desses fatores de análise citados:

- Média aritmética: Consiste em um resultado médio ($\bar{x}$) de um determinado conjunto de amostras, ou seja é a soma de cada termo das amostras (x_i) dividido pelo número total de amostras (N) como apresentado pela Equação (3.21):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (3.21)$$

- Moda: É o termo que possui maior repetição em um conjunto de amostras.
- Número de ocorrências da moda: É a quantidade de vezes que a moda se repete em um conjunto de amostras.

Para a coleta dos resultados, primeiramente, cada método foi testado individualmente (heurística A, heurística B e Colônia de Formigas), onde foram realizadas 100 execuções (para a obtenção de 100 amostras) de cada um e foi retirada a média das 100 amostras dos custos após a alocação dos bancos de capacitores, a moda, o número de ocorrências da moda e as alocações referentes à moda.

Em seguida, iniciou-se o algoritmo Colônia de Formigas com as 100 soluções da heurística A. Depois, iniciou-se o algoritmo com 100 soluções da heurística B e, por último, iniciou-se o algoritmo Colônia de Formigas com as 200 soluções de ambas as heurísticas. Em todos os testes do Colônia de Formigas, foi analisado um conjunto de 500 formigas; sendo que das 500, algumas soluções ou formigas foram provenientes das heurísticas como apresentado anteriormente. Em todos os testes, foi considerada a alocação de capacitores fixos.

Essas execuções foram aplicadas aos sistemas de 10, 33 e 135 barras. Já o sistema de 476 barras, devido ao alto custo computacional, para os testes do Colônia de Formigas trabalhando individualmente, Heurística A com o Colônia de Formigas, Heurística B com o Colônia de Formigas e Heurísticas A e B com o Colônia de Formigas, foram determinadas 30 execuções (30 amostras).

4 Testes e resultados

Foram selecionados 4 sistemas para o teste dos algoritmos implementados: 10 Civanlar et al. (1988), 33 Baran e Wu (1989b), 135 Gallego, Monticelli e Romero (2001), Guimarães (2005) e 476 barras Casagrande (2010). A partir dessas referências, foram extraídas as características de cada sistema que serão apresentadas a seguir. Os dados das barras e das linhas dos sistemas de 135 e 476 barras encontram-se no Anexo A.

4.1 Característica dos sistemas

- Sistema de 10 barras

Esse sistema possui uma tensão nominal de 23kV. Em cada barra será permitida a alocação de até 3 capacitores de 300kVAr cada, com um custo de \$4,9/kVAr. Esse sistema tem um custo adicional de \$168/kVAr para o período de demanda máxima. Para a simulação deste, consideram-se três patamares de demanda sendo 1,1 pu para o nível pesado, 0,6pu para o nível médio e 0,3pu para o nível leve. O custo da energia definido foi \$0,06/kWh para os três níveis de demanda. O período total de simulação considerado foi de 1 ano ou 8760 horas; sendo 1000 horas para o nível pesado, 6760 para o nível médio e 1000 para o nível leve. Consideram-se também os limites máximos e mínimos de tensão de $\pm 5\%$ de 1pu. O sistema apresenta um custo inicial da função objetivo de \$329.040.

- Sistema de 33 barras

O sistema de 33 barras possui uma tensão nominal de 12,66kV. Em cada barra será permitida a alocação de até 3 capacitores de 200kVAr cada, com um custo de \$4/kVAr. Os três patamares de demanda definidos foram 1,6 pu para o nível pesado, 1pu para o nível médio e 0,5pu para o nível leve. O custo da energia e o limite de tensão foram os mesmos do sistema de 10 barras e o período de simulação considerado foi 1095 horas para o nível pesado, 4015 para o nível médio e 3650 para o nível leve. O sistema apresenta um custo inicial da função objetivo \$96.940.

- Sistema de 135 barras

Esse sistema possui uma tensão nominal de 13,8kV. Em cada barra será permitida a alocação de até 5 capacitores de 300kVAr cada, com um custo de \$3/kVAr. Esse sistema tem um custo adicional de \$1000 por barra escolhida para a alocação dos capacitores. Os três patamares de demanda definidos foram 1,8pu para o nível pesado, 1pu para o nível médio e 0,5pu para o nível leve. O custo da

energia, os limites de tensão e o período de simulação foram os mesmos do sistema de 10 barras. O sistema de 135 barras apresenta um custo inicial da função objetivo de \$201.580.

- Sistema de 476 barras

Esse sistema possui uma tensão nominal de 13,8kV. Em cada barra será permitida a alocação de até 3 capacitores de 200kVAR cada, com um custo de \$4/kVAR. Os três patamares de demanda definidos foram 2,45pu para o nível pesado, 1pu para o nível médio e 0,5pu para o nível leve. O custo da energia definido foi \$0,108/kWh para o nível pesado \$0,06/kWh para os níveis médio e leve. Os limites de tensão e o período de simulação foram os mesmos do sistema de 10 barras. O sistema de 476 barras apresenta um custo inicial de \$238.160.

4.2 Dados de ajuste dos métodos

Para a execução dos métodos, é necessário definir alguns parâmetros de entrada os quais são apresentados na Tabela 6:

Tabela 6 – Parâmetros de entrada das heurísticas

Heurísticas A e B				
Parâmetros	Valores dos parâmetros			
	10 barras	33 barras	135 barras	476 barras
qexec	100	100	100	30
nivelD (pu)	[1.1 0.6 0.3]	[1.6 1 0.5]	[1.8 1 0.5]	[2.45 1 0.5]
ncapMax	3	3	5	3
potcap (KVAR)	300	200	300	200
CMVAR (\$/MVAR)	4900	4000	3000	4000
Cenerg (\$/KWh)	[0.06 0.06 0.06]	[0.06 0.06 0.06]	[0.06 0.06 0.06]	[0.108 0.06 0.06]
tOP (horas)	[1000 6760 1000]	[1095 4015 3650]	[1000 6760 1000]	[1000 6760 1000]
limiteV (%)	5	5	5	5

Os parâmetros de entrada do algoritmo Colônia de Formigas são os mesmos da Tabela 6, com a adição de $nF = 500$ formigas e $\text{taxaEvap} = 20\%$.

4.3 Análises dos resultados dos métodos implementados

As simulações foram realizadas no software Matlab. Para essas simulações, foram feitas duas análises. A primeira consiste em apresentar o custo sem a alocação de capacitores e a média dos custos com a alocação, para se comparar a redução dos custos obtida em cada teste. A segunda apresenta a moda, o número de ocorrências da moda e as alocações dos capacitores.

4.3.1 Análise de redução de custos

Nessa análise, para as execuções realizadas, obteve-se a média dos custos com a alocação de capacitores em cada teste. Para melhor visualização, foi construído um gráfico que apresenta o custo sem a alocação de bancos de capacitores de verde e o custo com a alocação dos bancos de capacitores de azul. Nesses gráficos, os métodos que apresentaram o menor custo após a alocação dos bancos de capacitores foram indicados através de uma seta.

- Sistema de 10 barras

Para esse sistema, o algoritmo de força bruta implementado retornou o valor ótimo global de \$309080. Pelo gráfico da Figura 25 esse valor foi atingido ao utilizar a Heurística A combinada com o Colônia de Formigas e as Heurísticas A e B combinadas com o Colônia de Formigas. Nesses casos, ocorreu uma redução de aproximadamente 6,1% do custo inicial.

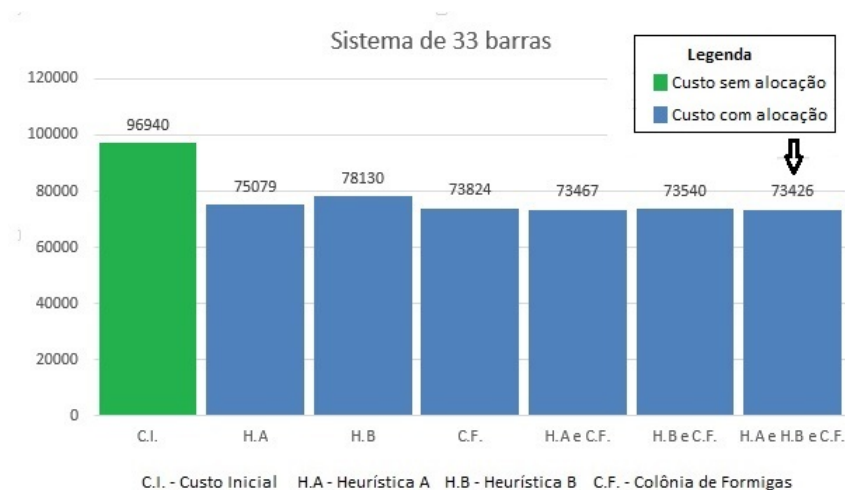
Figura 25 – Custos da função objetivo do sistema de 10 barras



- Sistema de 33 barras

Nesse caso, a melhor média dos custos ocorreu na combinação das Heurísticas A e B com Colônia de Formigas (Figura 26), apresentando uma redução de aproximadamente 24,3% do custo inicial. Esse valor se aproximou da solução encontrada em Duque (2013) e Casagrande (2010), as quais apresentaram uma redução de aproximadamente 24,4%.

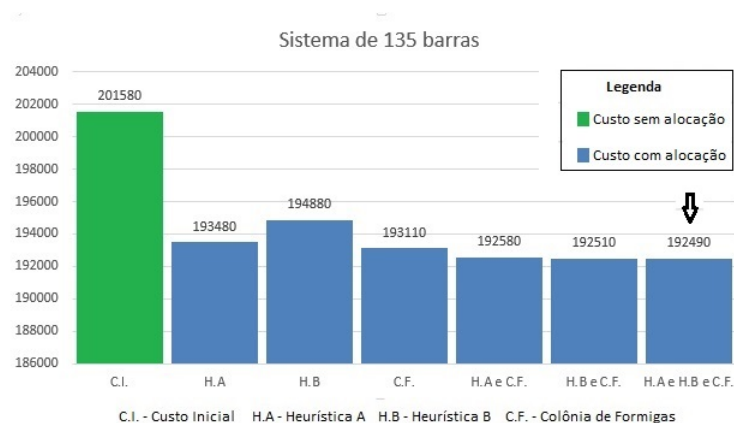
Figura 26 – Custos da função objetivo do sistema de 33 barras



- Sistema de 135 barras

Assim como no sistema de 33 barras, a melhor média dos custos ocorreu na combinação das Heurísticas A e B com Colônia de Formigas (Figura 27), apresentando uma redução de aproximadamente 4,5% do custo inicial. Essa redução aproximou de Gallego, Monticelli e Romero (2001), o qual apresentou uma redução de aproximadamente 4,6%.

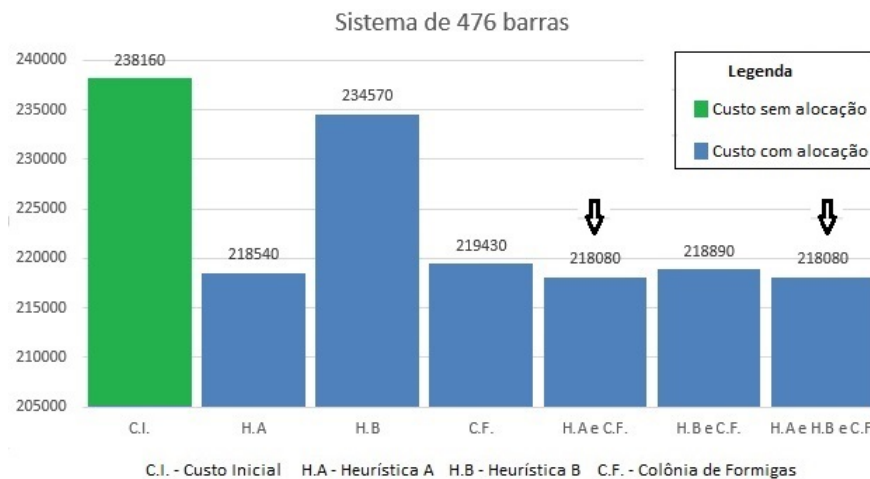
Figura 27 – Custos da função objetivo do sistema de 135 barras



- Sistema de 476 barras

Nesse caso, a melhor solução ocorreu na Heurística A combinada com o Colônia de Formigas e nas Heurísticas A e B combinadas com o Colônia de Formigas (Figura 28), apresentando uma redução de aproximadamente 8,4% do custo inicial. Esse valor se aproximou da redução encontrada por Casagrande (2010) de 8,5% e Duque (2013) de 8,2%.

Figura 28 – Custos da função objetivo do sistema de 476 barras



4.3.2 Alocação dos capacitores considerando a moda

A análise consiste em apresentar a moda dos custos com a alocação de capacitores, mostrando as barras e a quantidade de capacitores alocados nas barras. Por exemplo, Na Tabela 8, $B_{10} = 2$ significa que na barra 10 foram alocados 2 capacitores.

- Sistema de 10 barras

Pela Tabela 7 percebe-se que todos os métodos apresentaram uma ocorrência da moda superior a 46%. Dessas comparações, as Heurísticas H.A e H.B combinadas com o algoritmo C.F. apresentou uma alta taxa de ocorrências (99%). O valor ótimo global encontrado pelo algoritmo força bruta, corresponde ao valor da moda encontrada para essa combinação (\$309.080).

Tabela 7 – Moda das execuções para o sistema de 10 barras

Comparações	Custo com a alocação	
	Moda	Ocorrências Moda
H.A	\$ 309.920	47
H.B	\$ 319.860	46
C.F.	\$ 309.080	65
H.A e C.F.	\$ 309.080	96
H.B. e C.F.	\$ 309.080	67
H.A e H.B e C.F	\$ 309.080	99
Força Bruta	\$ 309.080	
H.A - Heurística A / H.B - Heurística B / C.F. - Colônia de Formigas		

Na Tabela 8, observa-se que as comparações C.F., H.A combinada com o C.F., a H.B combinada C.F e as Heurísticas H.A e H.B combinadas com C.F. obtiveram as alocações dos bancos de capacitores nas mesmas barras. Já os métodos H.A e H.B apresentaram alocações diferentes porém as barras escolhidas para a alocação dos bancos de capacitores eram próximas ou iguais às barras escolhidas pelas outras.

Tabela 8 – Alocações dos capacitores no sistema de 10 barras

Comparações	Alocações da Moda	Total de capacitores
H.A	B4 = 1; B5 = 3; B6 = 2; B7 = 2; B10 = 1	9
H.B	B10 = 2	2
C.F.	B5 = 3; B6 = 2; B7 = 2; B10 = 1	7
H.A e C.F.	B5 = 3; B6 = 2; B7 = 2; B10 = 1	7
H.B. e C.F.	B5 = 3; B6 = 2; B7 = 2; B10 = 1	7
H.A e H.B e C.F	B5 = 3; B6 = 2; B7 = 2; B10 = 1	7
Força Bruta	B5 = 3; B6 = 2; B7 = 2; B10 = 1	7
H.A - Heurística A / H.B - Heurística B / C.F. - Colônia de Formigas		

- Sistema de 33 barras

Pela Tabela9 é notório que os resultados apresentados pelas ocorrências da Moda estão no intervalo entre 2% e 23%. As Heurísticas A e B combinadas com o algoritmo Colônia de Formigas apresentou a maior taxa de ocorrências (23%), assim como no sistema de 10 barras.

Tabela 9 – Moda das execuções para o sistema de 33 barras

Comparações	Custo com a alocação	
	Moda	Ocorrências Moda
H.A	\$ 73.905	4
H.B	\$ 78.774	12
C.F.	\$ 73.735	2
H.A e C.F.	\$ 73.343	12
H.B. e C.F.	\$ 73.427	16
H.A e H.B e C.F	\$ 73.343	23
H.A - Heurística A / H.B - Heurística B / C.F. - Colônia de Formigas		

Na Tabela 10, observa-se que nas comparações onde ocorreram a combinação das Heurísticas com o algoritmo Colônia de Formigas, o total de banco capacitores alocados foram iguais (7 bancos), mas, apesar de apresentarem o mesmo valor, a moda encontrada pelo H.B combinada com C.F. foi diferente da moda encontrada pelos outros dois. Isso se deve ao fato da alocação dos bancos de capacitores ocorrerem bem barras diferentes.

Tabela 10 – Alocações dos capacitores no sistema de 33 barras

Comparações	Alocações da Moda	Total de capacitores
H.A	B6 = 1; B7 = 1; B13 = 1; B23 = 1; B24 = 1; B29 = 3; B31 = 1	9
H.B	B23 = 1; B24 = 1; B29 = 3;	5
C.F.	B7 = 1; B12 = 1; B29 = 3; B31 = 1	6
H.A e C.F.	B7 = 1; B14 = 1; B24 = 1; B29 = 3; B31 = 1	7
H.B. e C.F.	B7 = 1; B13 = 1; B23 = 1; B29 = 3; B31 = 1	7
H.A e H.B e C.F	B7 = 1; B14 = 1; B24 = 1; B29 = 3; B31 = 1	7
H.A - Heurística A / H.B - Heurística B / C.F. - Colônia de Formigas		

- Sistema de 135 barras

Pela Tabela11, constata-se que os resultados apresentados pelas ocorrências da Moda estão no intervalo entre 4% e 51%. Novamente as heurísticas H.A e H.B combinadas com o algoritmo C.F. apresentou a maior taxa de ocorrências (51%). As comparações H.A, H.B, C.F e H.A com C.F apresentaram o mesmo valor da Moda(\$192.740), que foram próximos da moda apresentada pelas outras duas (\$192.440).

Tabela 11 – Moda das execuções para o sistema de 135 barras

Comparações	Custo com a alocação	
	Moda	Ocorrências Moda
H.A	\$ 192.740	38
H.B	\$ 192.740	29
C.F.	\$ 192.740	4
H.A e C.F.	\$ 192.740	16
H.B. e C.F.	\$ 192.440	45
H.A e H.B e C.F	\$ 192.440	51
H.A - Heurística A / H.B - Heurística B / C.F. - Colônia de Formigas		

Na Tabela 12, verifica-se que as comparações (H.B com o C.F) e (H.A e H.B com o C.F) apresentaram alocações em quantidades maiores de barras em relação as outras comparações, resultando num valor da Moda menor.

Tabela 12 – Alocações dos capacitores no sistema de 135 barras

Comparações	Alocações da Moda	Total de capacitores
H.A	B106 = 4	4
H.B	B106 = 4	4
C.F.	B106 = 4	4
H.A e C.F.	B106 = 4	4
H.B. e C.F.	B36 = 2; B106 = 4	6
H.A e H.B e C.F	B36 = 2; B106 = 4	6
H.A - Heurística A / H.B - Heurística B / C.F. - Colônia de Formigas		

- Sistema de 476 barras

Para esse caso, as comparações H.A e H.B tiveram um total de 100 execuções assim como nos casos anteriores. Já as comparações C.F., H.A com C.F, H.B com C.F e (H.A e H.B com C.F.), tiveram um total de 30 execuções devido ao alto custo computacional.

Na Tabela 13, das comparações que tiveram um total de 30 execuções, a H.A e H.B com C.F. apresentou a maior ocorrência da moda (11%). Os valores da Moda para as 6 comparações foram todos diferentes.

Tabela 13 – Moda das execuções para o sistema de 476 barras

Comparações	Custo com a alocação	
	Moda	Ocorrências Moda
H.A	\$ 219.070	3
H.B	\$ 235.870	46
C.F.	\$ 218.900	2
H.A e C.F.	\$ 218.060	8
H.B. e C.F.	\$ 218.720	2
H.A e H.B e C.F	\$ 218.110	11
H.A - Heurística A / H.B - Heurística B / C.F. - Colônia de Formigas		

Na Tabela 14, nota-se que a H.B resultou na alocação do banco de capacitor em somente 1 barra. Em todos os sistemas essa heurística apresentou como característica a alocação em poucas barras e nesse caso apresentou um valor da Moda alto em comparação aos demais.

Tabela 14 – Alocações dos capacitores no sistema de 476 barras

Comparações	Alocações da Moda	Total de capacitores
H.A	B17 = 1; B18 = 1; B21 = 1; B32 = 1; B60 = 1; B67 = 3; B71 = 1; B92 = 1; B125 = 1; B161 = 3	14
H.B	B66 = 1	1
C.F.	B56 = 2; B59 = 3; B102 = 3; B104 = 1; B113 = 2; B216 = 1	12
H.A e C.F.	B18 = 1; B32 = 1; B60 = 1; B67 = 1; B71 = 2; B92 = 2; B118 = 1; B125 = 1; B161 = 2; B214 = 1	13
H.B. e C.F.	B36 = 2; B56 = 2; B57 = 2; B66 = 1; B78 = 3; B112 = 2; B121 = 2	14
H.A e H.B e C.F	B18 = 1; B32 = 1; B60 = 2; B67 = 1; B68 = 1; B71 = 1; B92 = 2; B125 = 1; B144 = 1; B161 = 2; B214 = 1	14
H.A - Heurística A / H.B - Heurística B / C.F. - Colônia de Formigas		

5 Conclusões

O presente trabalho implementou uma heurística A que utilizou o índice de sensibilidade de Salam, Chikhani e Hackam (1994), uma heurística B que utilizou o índice de sensibilidade de Elgerd (1971) e uma metaheurística Colônia de Formigas adaptada por Casagrande (2010). O objetivo foi a redução dos custos totais que envolvem o custo das perdas e o custo de instalação dos bancos de capacitores.

Dos resultados obtidos, A Heurística B apresentou uma redução de custo inferior aos demais métodos em todos os sistemas avaliados. Para o sistema de 10 barras foi obtido uma redução de 3,4% e para o sistema de 476 foi obtido uma redução de 1,5%.

Por outro lado, quando a heurística B e a heurística A são combinadas com o algoritmo Colônia de Formigas apresentaram os melhores resultados. Para o sistema de 10 barras, o resultado encontrado (redução de 6,1%) é equivalente ao ótimo global do problema, o qual foi determinado pelo algoritmo de força bruta implementado. Para o sistema de 476 barras, o resultado encontrado (redução de 8,4%) foi superior a referência (DUQUE, 2013).

Das tabelas da Seção 4.3.2, é notório que a combinação das heurísticas A e B com o algoritmo Colônia de Formigas no sistema com poucas barras (10 barras) mostrou-se muito eficiente, pois num total de 100 execuções houveram 99% de ocorrências da moda e essa moda corresponde ao ótimo global. A Heurística B apresentou uma alocação dos bancos de capacitores em uma quantidade menor de barras em relação às outras combinações. Esse pode ser um dos fatores que levou essa heurística a uma redução de custo inferior às demais comparações.

A partir das análises realizadas, conclui-se que a combinação das heurísticas A e B com o algoritmo Colônia de Formigas apresentou resultados promissores, uma vez que esses foram melhores que as demais comparações e se aproximaram dos resultados encontrados na literatura.

6 Propostas para trabalhos futuros

Para os trabalhos futuros sugere-se

- Estender a aplicação dos métodos implementados nesse trabalho aos capacitores variáveis;
- Realizar os testes em sistemas de distribuição maiores para verificar o comportamento dos métodos;

Referências

- ANEEL, A. N. de E. E. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST - Módulo 1 - Revisão 9*. 2017. Acesso em: 20 de Junho de 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo1_Revisao_9/1b78da82-6503-4965-abc1-a2266eb5f4d7>.
- ANNALURU, R.; DAS, S.; PAHWA, A. Multi-level ant colony algorithm for optimal placement of capacitors in distribution systems. *In: Congress on Evolutionary Computation 2004, CEC2004*, v. 2, p. 1932–1937, 2004.
- BARAN, M. E.; WU, F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 2, p. 1401–1407, 1989.
- BARAN, M. E.; WU, F. F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 1, p. 725–734, 1989.
- BONABEAU, E.; DORIGO, M.; THERAULAZ, G. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. 1. ed. [S.l.]: Oxford University Press, 1999. 1–320 p.
- BOONE, G.; CHIANG, H. D. Optimal capacitor placement in distribution systems by genetic algorithm. *Electrical Power & Energy Systems*, v. 15, n. 3, p. 155–162, 1993.
- CASAGRANDE, C. G. *Alocação de capacitores e ajustes de tapes para minimização de perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica*. 132 p. Tese (Mestrado) — Universidade Estadual de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2010.
- CIVANLAR, S. et al. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3, n. 3, p. 1217–1223, 1988.
- DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics, Part B*, v. 26, n. 1, p. 1–26, 1996.
- DUQUE, F. G. *Alocação de Capacitores em Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Técnica de Otimização Bio-Inspirada*. 122 p. Tese (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013.
- DURAN, H. Optimum number, location, and size of shunt capacitors in radial distribution feeders, a dynamic programming approach. *IEEE Transactions Power Apparatus and Systems*, v. 87, n. 9, p. 1769–1774, 1968.
- ELGERD, O. I. *Electric Energy Systems Theory*. 2. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1971. 274–313 p.
- FILHO, M. C. P.; LACERDA, E. de; JUNIOR, M. F. M. Capacitor placement using ant colony optimization and gradient. *In: 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, ISAP 2009*.

- FUCHS, R. D. *Transmissão de Energia Elétrica: Linhas aéreas*. 1. ed. [S.l.]: LTC / EFEI, 1977. 1–255 p.
- G., R. C. New method for the analysis of distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 1, p. 391–396, 1990.
- GALLEGO, R. A.; MONTICELLI, A. J.; ROMERO, R. Optimal capacitor placement in radial distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 16, n. 4, p. 630–637, 2001.
- GÖNEN, T. *Electrical Power Distribution System Engineering*. [S.l.]: CRC Press, 2008. 371–431 p.
- GOSWAMI, S. K.; BASU, S. K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 3, p. 1484–1491, 1992.
- GUIMARÃES, M. A. do N. *Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica utilizando algoritmos de Busca Tabu*. 108 p. Tese (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- HUANG, Y.-C.; YANG, H.-T.; HUANG, C.-L. Solving the capacitor placement problem in a radial distribution system using tabu search approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 4, p. 1868–1873, 1996.
- JUNIOR, I. C. da S. Metodologia heurística construtiva para alocação de banco de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica. *Revista Controle & Automação*, v. 19, n. 1, p. 72–82, 2008.
- KAGAN, N. *Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. 2. ed. [S.l.]: Edgard Blücher, 2010. 1–44 p.
- KERSTING, W. H. *Distribution System Modeling And Analysis*. 1. ed. [S.l.]: CRC Press, 2002. 1–266 p.
- LUCIA, T. M. C. D. *As Formigas Cortadeiras*. 1. ed. [S.l.]: Folha de Viçosa, 1993. 1–252 p.
- MONTICELLI, A. J. *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. [S.l.]: Edgard Blücher, 1983. 1–14 p.
- NG, H. N.; SALAMA, M. M. A.; CHIKHANI, A. Y. Classification of capacitor allocation techniques. *Phys. Rev. Lett.*, v. 15, n. 1, p. 387–392, 2000.
- PEARL, J. *Heuristics - Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving*. [S.l.]: Addison-Wesley, 1984. 3–26 p.
- RAO, S. S. *Engineering Optimization - Theory and Practice*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. 63–694 p.
- SALAM, T. A.; CHIKHANI, A. Y.; HACKAM, R. A new technique for loss reduction using compensating capacitors applied to distribution systems with varying load condition. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 9, n. 2, p. 819–827, 1994.

SHIRMOHAMMADI, D. et al. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 3, n. 2, p. 753–762, 1988.

SHORT, T. A. *Electric Power Distribution Handbook*. 1. ed. [S.l.]: CRC Press, 2004. 1–275 p.

TALBI, E.-G. *Metaheuristics: From design to implementation*. 1. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. 1–587 p.

Anexo A - Sistemas de 135 e 476 barras

Tabela 15 – Dados das linhas e das cargas do sistema de 135 barras

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Carga Barra final (KW)	Carga Barra final (KVar)
1	1	2	0,33205	0,76653	0	0
2	2	3	0,00188	0,00433	47,78	19,009
3	3	4	0,2234	0,51535	42,551	16,929
4	4	5	0,09943	0,22953	87,022	34,622
5	5	6	0,15571	0,35945	311,31	123,855
6	6	7	0,16321	0,37677	148,869	59,228
7	7	8	0,11444	0,26417	238,672	94,956
8	7	9	0,05675	0,05666	62,299	24,786
9	9	10	0,52124	0,27418	124,598	49,571
10	9	11	0,10877	0,1086	140,175	55,768
11	11	12	0,39803	0,20937	116,813	46,474
12	11	13	0,91744	0,31469	249,203	99,145
13	11	14	0,11823	0,11805	291,447	115,592
14	14	15	0,50228	0,26421	303,72	120,835
15	14	16	0,05675	0,05666	215,396	85,695
16	16	17	0,29379	0,15454	198,586	79,007
17	1	18	0,33205	0,76653	0	0
18	18	19	0,00188	0,00433	0	0
19	19	20	0,22324	0,51535	0	0
20	20	21	0,10881	0,25118	30,127	14,729
21	21	22	0,71078	0,37388	230,972	112,92
22	21	23	0,18197	0,42008	60,256	29,459
23	23	24	0,30326	0,15952	230,972	112,92
24	23	25	0,02439	0,0563	120,507	58,915
25	25	26	0,04502	0,10394	0	0
26	26	27	0,01876	0,04331	56,981	27,857
27	27	28	0,11823	0,1123	364,665	178,281
28	28	29	0,02365	0,02361	0	0
29	29	30	0,18954	0,0997	124,647	60,939
30	30	31	0,39803	0,20937	56,981	27,857
31	29	32	0,05675	0,05666	0	0
32	32	33	0,09477	0,04985	85,473	41,787
33	33	34	0,41699	0,21934	0	0
34	34	35	0,11372	0,05982	396,735	193,96
35	32	36	0,07566	0,07555	0	0
36	36	37	0,3696	0,19442	181,152	88,563
37	37	38	0,26536	0,13958	242,172	118,395
38	36	39	0,05675	0,0566	75,316	36,821
39	1	40	0,33205	0,76653	0	0
40	40	41	0,11819	0,27283	1,254	0,531
41	41	42	2,96288	1,01628	6,274	2,66
42	41	43	0,00188	0,00433	0	0
43	43	44	0,06941	0,16024	117,88	49,971
44	44	45	0,81502	0,42872	62,668	25,566
45	44	46	0,06378	0,14724	172,285	73,034
46	46	47	0,13132	0,30315	458,556	194,388
47	47	48	0,06191	0,14291	262,962	111,473
48	48	49	0,11444	0,26417	235,761	99,942

Tabela 16 – Continuação dos dados das linhas e das cargas do sistema de 135 barras

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Carga Barra final (KW)	Carga Barra final (KVAr)
49	49	50	0,28374	0,28331	0	0
50	50	51	0,28374	0,28321	109,215	46,298
51	49	52	0,04502	0,10394	0	0
52	52	53	0,02626	0,06063	72,809	30,865
53	53	54	0,06003	0,13858	258,473	109,57
54	54	55	0,03002	0,06929	69,169	29,322
55	55	56	0,02064	0,04764	21,843	9,26
56	53	57	0,10881	0,25118	0	0
57	57	58	0,25588	0,1346	20,527	8,702
58	58	59	0,41699	0,21934	150,548	63,819
59	59	60	0,50228	0,26421	220,687	93,552
60	60	61	0,3317	0,17448	92,384	39,163
61	61	62	0,20849	0,10967	0	0
62	48	63	0,13882	0,32047	226,693	96,098
63	1	64	0,0075	0,01732	0	0
64	64	65	0,27014	0,62362	294,016	116,974
65	65	66	0,3827	0,88346	83,015	33,028
66	66	67	0,33018	0,7622	83,015	33,028
67	67	68	0,3283	0,75787	103,77	41,285
68	68	69	0,17072	0,39409	176,408	70,184
69	69	70	0,55914	0,29412	83,015	33,028
70	69	71	0,05816	0,13425	217,917	86,698
71	71	72	0,7013	0,3689	23,294	9,267
72	72	73	1,02352	0,53839	5,075	2,019
73	71	74	0,06754	0,15591	72,638	28,899
74	74	75	1,32352	0,45397	405,99	161,523
75	1	76	0,01126	0,02598	0	0
76	76	77	0,72976	1,68464	100,182	42,468
77	77	78	0,22512	0,51968	142,523	60,417
78	78	79	0,20824	0,48071	96,042	40,713
79	79	80	0,0469	0,10827	300,454	127,366
80	80	81	0,6195	0,61857	141,238	59,873
81	81	82	0,34049	0,33998	279,847	118,631
82	82	83	0,56862	0,29911	87,312	37,013
83	82	84	0,10877	0,1086	243,849	103,371
84	84	85	0,56862	0,29911	247,75	105,025
85	1	86	0,01126	0,02598	0	0
86	86	87	0,41835	0,96575	89,878	38,101
87	87	88	0,10499	0,13641	1137,28	482,108
88	87	89	0,43898	1,01338	458,339	194,296
89	89	90	0,0752	0,02579	385,197	163,29
90	90	91	0,07692	0,17756	0	0
91	91	92	0,33205	0,76653	79,608	33,747
92	92	93	0,08442	0,19488	87,312	37,013
93	93	94	0,1332	0,30748	0	0
94	94	95	0,2932	0,29276	74,001	31,37
95	95	96	0,21753	0,21721	232,05	98,369
96	96	97	0,26482	0,26443	141,819	60,119

Tabela 17 – Continuação dos dados das linhas e das cargas do sistema de 135 barras

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Carga Barra final (KW)	Carga Barra final (KVar)
98	98	99	0,13507	0,31181	76,449	32,408
99	1	100	0,00938	0,02165	0	0
100	100	101	0,16884	0,38976	51,322	21,756
101	101	102	0,11819	0,27283	59,874	25,381
102	102	103	2,28608	0,78414	9,065	3,843
103	102	104	0,45587	1,05236	2,092	0,887
104	104	105	0,696	1,60669	16,735	7,094
105	105	106	0,45774	1,05669	1506,522	638,634
106	106	107	0,20298	0,26373	313,023	132,694
107	107	108	0,21348	0,27737	79,831	33,842
108	108	109	0,54967	0,28914	51,322	21,756
109	109	110	0,54019	0,28415	0	0
110	108	111	0,0455	0,05911	202,435	85,815
111	111	112	0,47385	0,24926	60,823	25,874
112	112	113	0,86241	0,45364	45,618	19,338
113	113	114	0,56862	0,29911	0	0
114	109	115	0,77711	0,40878	157,07	66,584
115	115	116	1,08038	0,5683	0	0
116	110	117	1,06633	0,57827	250,148	106,041
117	117	118	0,47385	0,24926	0	0
118	105	119	0,32267	0,74488	68,809	28,593
119	119	120	0,14633	0,33779	32,072	13,596
120	120	121	0,12382	0,28583	61,084	25,894
121	1	122	0,01126	0,02598	0	0
122	122	123	0,6491	1,49842	94,622	46,26
123	123	124	0,04502	0,10394	49,858	24,375
124	124	125	0,5264	0,18056	123,164	60,214
125	124	126	0,02064	0,04764	78,35	38,304
126	126	127	0,53071	0,27917	145,475	71,121
127	126	128	0,09755	0,2252	21,369	10,447
128	128	129	0,11819	0,27283	74,789	36,564
129	128	130	0,13882	0,32047	227,926	111,431
130	130	131	0,04315	0,09961	35,614	17,411
131	131	132	0,09192	0,2122	249,295	121,877
132	132	133	0,16134	0,37244	316,722	154,842
133	133	134	0,37832	0,37775	333,817	163,199
134	134	135	0,39724	0,39664	249,295	121,877
135	135	136	0,2932	0,29276	0	0
136	8	74	0,13132	0,30315	0	0
137	10	25	0,26536	0,13958	0	0
138	16	84	0,14187	0,14166	0	0
139	39	136	0,08512	0,08499	0	0
140	26	52	0,04502	0,10394	0	0
141	51	97	0,14187	0,14166	0	0
142	56	99	0,14187	0,14166	0	0
143	63	121	0,0394	0,09094	0	0
144	67	80	0,12944	0,29882	0	0
145	80	132	0,01688	0,03898	0	0
146	85	136	0,3317	0,17448	0	0

Tabela 18 – Continuação dos dados das linhas e das cargas do sistema de 135 barras

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Carga Barra final (KW)	Carga Barra final (KVAr)
147	92	105	0,14187	0,17166	0	0
148	91	130	0,07692	0,17756	0	0
149	91	104	0,07692	0,17756	0	0
150	93	105	0,07692	0,17756	0	0
151	93	133	0,07692	0,17756	0	0
152	97	121	0,26482	0,26443	0	0
153	111	48	0,49696	0,64567	0	0
154	127	77	0,17059	0,08973	0	0
155	129	78	0,05253	0,12126	0	0
156	136	99	0,2932	0,29276	0	0

Tabela 19 – Dados das cargas do sistema de 476 barras

Barra	P (MW)	Q (MVAR)	Barra	P (MW)	Q(MVAR)	Barra	P (MW)	Q(MVAR)
1	0	0	37	0	0	73	0	0
2	0	0	38	0	0	74	0	0
3	0	0	39	0	0	75	0	0
4	0.43015	0.17782	40	0	0	76	0	0
5	0	0	41	0	0	77	0	0
6	0	0	42	0	0	78	0	0
7	0	0	43	0	0	79	0	0
8	0	0	44	0	0	80	0	0
9	0.43015	0.17782	45	0	0	81	0	0
10	0.43015	0.17782	46	0	0	82	0	0
11	0.43015	0.17782	47	0	0	83	0	0
12	0	0	48	0	0	84	0	0
13	0	0	49	0	0	85	0	0
14	0	0	50	0	0	86	0	0
15	0	0	51	0	0	87	0	0
16	0.43015	0.17782	52	0.001003	-0.00281	88	0	0
17	0.43015	0.17782	53	0	0	89	0	0
18	0	0	54	0	0	90	0	0
19	0	0	55	0	0	91	0.43015	0.17782
20	0.43015	0.17782	56	0	0	92	0	0
21	0	0	57	0	0	93	0.000685	0.00203
22	0	0	58	0	0	94	0	0
23	0	0	59	0.43015	0.17782	95	0	0
24	0	0	60	0	0	96	0	0
25	0	0	61	0	0	97	0.000822	0.001374
26	0	0	62	0	0	98	0	0
27	0	0	63	0	0	99	0.13015	0.042778
28	0	0	64	0	0	100	0	0
29	0	0	65	0	0	101	0	0
30	0	0	66	0.43015	0.17782	102	0	0
31	0.43015	0.17782	67	0.323	0.106165	103	0	0
32	0	0	68	0	0	104	0	0
33	0	0	69	0	0	105	0	0
34	0	0	70	0.43015	0.17782	106	0	0
35	0	0	71	0	0	107	0	0
36	0	0	72	0	0	108	0	0

Tabela 20 – Continuação dos dados das cargas do sistema de 476 barras

Barra	P (MW)	Q (MVAR)	Barra	P (MW)	Q(MVAR)	Barra	P (MW)	Q(MVAR)
109	0	0	145	0	0	181	0	0
110	0	0	146	0	0	182	0	0
111	0	0	147	0	0	183	0	0
112	0.000495	0.0014979	148	0	0	184	0	0
113	0	0	149	0.140238	0.074929	185	0	0
114	0	0	150	0	0	186	0	0
115	0	0	151	0	0	187	0	0
116	0	0	152	0	0	188	0	0
117	0.046746	0.0249762	153	0.04631	0.029671	189	0	0
118	0	0	154	0	0	190	0	0
119	0	0	155	0	0	191	0	0
120	0	0	156	0	0	192	0	0
121	0	0	157	0	0	193	0	0
122	0	0	158	0	0	194	0	0
123	0	0	159	0	0	195	0	0
124	0.47025	0.154564	160	0.78375	0.257606	196	0	0
125	0	0	161	0	0	197	0	0
126	0	0	162	0	0	198	0	0
127	0	0	163	0	0	199	0	0
128	0	0	164	0	0	200	0	0
129	0	0	165	0	0	201	0	0
130	0	0	166	0	0	202	0	0
131	0	0	167	0	0	203	0	0
132	0	0	168	0	0	204	0	0
133	0	0	169	0	0	205	0	0
134	0	0	170	0	0	206	0	0
135	0	0	171	0.213342	0.061394	207	0	0
136	0	0	172	0	0	208	0	0
137	0	0	173	0	0	209	0	0
138	0	0	174	0	0	210	0	0
139	0	0	175	0	0	211	0	0
140	0	0	176	0	0	212	0	0
141	0.000591	0.001121	177	0	0	213	0.32015	0.105228
142	0	0	178	0	0	214	0	0
143	0.083506	0.0205608	179	0	0	215	0	0
144	0	0	180	0	0	216	0	0

Tabela 21 – Continuação dos dados das cargas do sistema de 476 barras

Barra	P (MW)	Q (MVAR)	Barra	P (MW)	Q(MVAR)	Barra	P (MW)	Q(MVAR)
217	0	0	253	0	0	1032	0	0
218	0	0	254	0	0	1033	0.01634	0.005371
219	0	0	255	0	0	1034	0.01501	0.004934
220	0	0	256	0	0	1035	0	0
221	0	0	257	0	0	1036	0	0
222	0	0	1001	0	0	1037	0	0
223	0	0	1002	0	0	1038	0	0
224	0	0	1003	0.017005	0.005589	1039	0	0
225	0	0	1004	0	0	1040	0	0
226	0	0	1005	0.038	0.01249	1041	0	0
227	0	0	1006	0	0	1042	0.00627	0.002061
228	0	0	1007	0	0	1043	0	0
229	0	0	1008	0	0	1044	0	0
230	0	0	1009	0	0	1045	0	0
231	0	0	1010	0.03952	0.01299	1046	0	0
232	0	0	1011	0.027075	0.008899	1047	0.01482	0.004871
233	0	0	1012	0	0	1048	0.0019	0.000625
234	0	0	1013	0.029545	0.009711	1049	0.005415	0.00178
235	0	0	1014	0	0	1050	0	0
236	0	0	1015	0	0	1051	0.03534	0.011616
237	0	0	1016	0.012065	0.003966	1052	0.011305	0.003716
238	0	0	1017	0.013205	0.00434	1053	0	0
239	0	0	1018	0.01577	0.005183	1054	0	0
240	0	0	1019	0	0	1055	0	0
241	0	0	1020	0	0	1056	0.027455	0.009024
242	0	0	1021	0.01007	0.00331	1057	0	0
243	0	0	1022	0.026695	0.008774	1058	0	0
244	0	0	1021	0	0	1059	0	0
245	0	0	1024	0	0	1060	0	0
246	0	0	1025	0	0	1061	0	0
247	0	0	1026	0.005605	0.001842	1062	0.00779	0.00256
248	0	0	1027	0	0	1063	0	0
247	0	0	1028	0.01102	0.003622	1064	0	0
250	0	0	1029	0	0	1065	0	0
251	0	0	1030	0	0	1066	0	0
252	0	0	1031	0.042655	0.01402	1067	0	0

Tabela 22 – Continuação dos dados das cargas do sistema de 476 barras

Barra	P (MW)	Q (MVAR)	Barra	P (MW)	Q(MVAR)	Barra	P (MW)	Q(MVAR)
1068	0	0	1104	0.005795	0.001905	1140	0	0
1069	0	0	1105	0	0	1141	0.018525	0.006089
1070	0.010545	0.00346597	1106	0.00513	0.001686	1142	0	0
1071	0	0	1107	0	0	1143	0.017195	0.005652
1072	0	0	1108	0.00551	0.001811	1144	0	0
1073	0	0	1109	0	0	1145	0	0
1074	0	0	1110	0.00019	6.25E-02	1146	0	0
1075	0	0	1111	0	0	1147	0	0
1076	0	0	1112	0	0	1148	0	0
1077	0	0	1113	0	0	1149	0	0
1078	0	0	1114	0	0	1150	0	0
1079	0	0	1115	0	0	1151	0	0
1080	0	0	1116	0	0	1152	0	0
1081	0	0	1117	0	0	1153	0.010925	0.003591
1082	0	0	1118	0	0	1154	0.03401	0.011179
1083	0	0	1119	0	0	1155	0	0
1084	0	0	1120	0.006935	0.002279	1156	0.001995	0.000656
1085	0.00437	0.00143635	1121	0	0	1157	0	0
1086	0	0	1122	0	0	1158	0	0
1087	0	0	1123	0.011115	0.003653	1159	0	0
1088	0	0	1124	0	0	1160	0.087495	0.028758
1089	0	0	1125	0	0	1161	0	0
1090	0.00608	0.0019984	1126	0	0	1162	0	0
1091	0	0	1127	0	0	1163	0	0
1092	0	0	1128	0	0	1164	0	0
1093	0.010735	0.00352842	1129	0.012255	0.004028	1165	0	0
1094	0	0	1130	0.019665	0.006464	1166	0	0
1095	0	0	1131	0	0	1167	0	0
1096	0	0	1132	0	0	1168	0	0
1097	0	0	1133	0.020235	0.006651	1169	0.011685	0.003841
1098	0	0	1134	0	0	1170	0	0
1099	0	0	1135	0.075335	0.024761	1171	0.015865	0.005215
1100	0.020615	0.00677582	1136	0	0	1172	0	0
1101	0	0	1137	0.01083	0.00356	1173	0	0
1102	0.027645	0.00908647	1138	0.004085	0.001343	1174	0.008645	0.002841
1103	0	0	1139	0.024225	0.007962	1175	0	0

Tabela 23 – Continuação dos dados das cargas do sistema de 476 barras

Barra	P (MW)	Q(MVAR)	Barra	P (MW)	Q(MVAR)
1176	0.039995	0.0131457	1201	0	0
1177	0	0	1202	0	0
1178	0	0	1203	0	0
1179	0	0	1204	0.012065	0.00396557
1180	0.0209	0.0068695	1205	0.016055	0.00527702
1181	0.002185	0.00071818	1206	0.020615	0.00677582
1182	0	0	1207	0	0
1183	0	0	1208	0	0
1184	0	0	1209	0	0
1185	0	0	1210	0.004085	0.00134267
1186	0	0	1211	0.014725	0.00483987
1187	0.00551	0.00181105	1212	0.017385	0.005714
1188	0.0114	0.003747	1213	0.00646	0.002123
1189	0.12749	0.0419039	1214	0.02527	0.008306
1190	0	0	1215	0	0
1191	0	0	1216	0.01292	0.004247
1192	0	0	1217	0	0
1193	0	0	1218	0.01292	0.004247
1194	0	0			
1195	0	0			
1196	0.00703	0.00231065			
1197	0	0			
1198	0	0			
1199	0.01254	0.0041217			
1200	0	0			

Tabela 24 – Dados das linhas do sistema de 476 barras

De	Para	R (pu)	X (pu)	De	Para	R (pu)	X (pu)
1	1000	0,000283556	0,000378075	160	155	0,00025205	0,0001103
2	1	0,00001	0,00001	161	156	0,00211092	0,0009767
3	2	0,000299309	0,000598619	162	156	0,000393828	0,000189
4	3	0,0010082	0,000456841	163	158	0,00001	0,00001
5	3	0,000204791	0,000425334	164	159	0,00001	0,00001
6	5	9,45188E-05	0,000189038	165	163	0,0005041	0,0002363
7	6	0,000598619	0,00118148	166	164	0,000110272	0,0002205
8	6	0,000110272	0,000220544	167	165	0,00001	0,00001
9	7	0,000189038	0,000362322	168	166	0,00001	0,00001
10	7	3,15063E-05	6,30125E-05	169	166	3,15063E-05	6,301E-05
11	8	9,45188E-05	0,000173284	170	167	0,000598619	0,0002678
12	9	0,000204791	0,000409581	171	168	0,000598619	0,0002678
13	12	7,87656E-05	0,000173284	172	169	0,000189038	0,0003781
14	13	0,00001	0,00001	173	170	0,000157531	7,877E-05
15	14	0,000110272	0,000220544	174	170	0,000283556	0,000126
16	15	0,000267803	0,000519853	175	172	0,000283556	0,0005671
17	15	3,15063E-05	6,30125E-05	176	173	0,00001	0,00001
18	15	9,45188E-05	0,000189038	177	174	0,00001	0,00001
19	17	0,000283556	0,000330816	178	175	0,000330816	0,0001575
20	18	9,45188E-05	0,000204791	179	175	0,000110272	0,0002205
21	19	0,000110272	0,000220544	180	176	0,0005041	0,0002363
22	21	0,00001	0,00001	181	177	0,000882175	0,0004096
23	22	1,57531E-05	3,15063E-05	182	178	0,00001	0,00001
24	23	0,000110272	0,000220544	183	178	0,00025205	0,0001103
25	23	9,45188E-05	4,72594E-05	184	179	7,87656E-05	0,0001575
26	23	0,000456841	0,000220544	185	180	0,00155956	0,0007246
27	24	0,000110272	0,000204791	186	181	0,00001	0,00001
28	25	0,00001	0,00001	187	181	0,000803409	0,0003623
29	27	0,000220544	0,000456841	188	182	0,00140203	0,0006459
30	28	0,000393828	0,000189038	189	183	0,00001	0,00001
31	29	3,15063E-05	0,000063	125	190	185	0,0011972
32	29	7,87656E-05	0,000157531	191	185	0,000567113	0,0002521
33	29	7,87656E-05	0,000157531	192	186	0,000330816	0,0001575
34	30	0,000330816	6,30125E-05	193	187	0,000409581	0,000189
35	32	0,0005041	0,000236297	194	188	0,00001	0,00001
36	33	0,00001	0,00001	195	188	0,000913681	0,0004253

Tabela 25 – Continuação dos dados das linhas do sistema de 476 barras

De	Para	R (pu)	X (pu)	De	Para	R (pu)	X (pu)
37	35	0,00001	0,00001	196	189	0,000362322	0,0001733
38	36	0,000189038	0,000378075	197	190	0,00001	0,00001
39	37	0,000393828	6,30125E-05	198	190	0,000362322	0,0001733
40	38	3,15063E-05	7,87656E-05	199	191	0,000567113	0,0002521
41	40	0,000110272	0,000204791	200	193	0,000834916	0,0003781
42	40	0,000315063	0,000141778	201	194	0,000315063	0,0001418
43	40	0,000330816	0,000677384	202	195	0,00103971	0,0004726
44	41	0,000110272	0,000220544	203	195	0,00001	0,00001
45	43	9,45188E-05	0,000189038	204	196	0,00118148	0,0005514
46	44	0,00001	0,00001	205	197	0,00321364	0,0014808
47	45	0,000472594	0,000220544	206	198	0,000393828	0,000189
48	45	0,000267803	0,000535606	207	199	0,000267803	0,000126
49	46	6,30125E-05	0,000126025	208	199	9,45188E-05	4,726E-05
50	47	0,000441088	0,000204791	209	200	0,000708891	0,0003308
51	48	7,87656E-05	0,000157531	210	200	0,000677384	0,0003151
52	49	3,15063E-05	4,72594E-05	211	200	0,000614372	0,0002836
53	50	0,000441088	0,000204791	212	201	0,000346569	0,0001575
54	52	0,000126025	0,000141778	213	203	0,000157531	7,877E-05
55	52	0,000204791	0,000220544	214	205	0,00110272	0,0005041
56	52	7,87656E-05	7,87656E-05	215	206	0,00001	0,00001
57	53	0,00001	0,00001	216	208	0,00001	0,00001
58	54	9,45188E-05	0,000110272	217	209	0,00001	0,00001
59	55	0,000409581	0,000834916	218	210	0,00001	0,00001
60	56	0,00001	0,00001	219	215	0,00118148	0,0005514
61	57	9,45188E-05	4,72594E-05	220	216	0,000519853	0,0002363
62	58	0,00001	0,00001	221	217	0,00138628	0,0006459
63	60	0,000141778	0,000173284	222	218	0,000220544	0,0001103
64	60	7,87656E-05	9,45188E-05	223	219	0,0144299	1,575E-05
65	61	0,000425334	0,000204791	224	220	0,000567113	0,0002521
66	61	0,000866422	0,000393828	225	220	0,00001	0,00001
67	62	0,000488347	0,000220544	226	221	0,000441088	0,0002048
68	64	7,87656E-05	9,45188E-05	227	221	0,000472594	0,0002205
69	68	0,000535606	0,000614372	228	222	0,00193763	0,0008979
70	68	0,000267803	0,000299309	229	223	0,000378075	0,0001733
71	69	0,000141778	0,000157531	230	225	0,000189038	9,452E-05
72	71	0,00001	0,00001	231	227	0,00001	0,00001
73	72	0,000519853	0,000582866	232	228	0,000236297	0,0001103
74	73	0,000126025	0,000141778	233	229	0,00001	0,00001

Tabela 26 – Continuação dos dados das linhas do sistema de 476 barras

De	Para	R (pu)	X (pu)	De	Para	R (pu)	X (pu)
75	74	0,000346569	0,000393828	234	229	0,00154381	0,0007089
76	74	0,000425334	0,000204791	235	231	0,000850669	0,0003938
77	75	0,000236297	0,000267803	236	233	0,001276	0,0005514
78	76	0,00001	0,00001	237	235	0,000362322	0,0001733
79	77	0,000204791	0,000409581	238	235	0,000850669	0,0003938
80	78	0,00305611	0,00140203	239	235	0,000960941	0,0004411
81	79	0,000189038	0,000393828	240	236	0,000519853	0,0002363
82	79	0,000315063	0,000141778	241	238	0,000315063	0,0001418
83	79	0,00132326	0,000614372	242	239	0,00111847	0,0005199
84	80	0,000346569	0,000157531	243	239	0,000472594	0,0002205
85	80	0,00155956	0,000724644	244	240	0,00107121	0,0004883
86	80	0,000378075	0,000157531	245	240	0,00102395	0,0004568
87	81	9,45188E-05	0,000189038	246	242	0,00001	0,00001
88	82	0,00001	0,00001	247	243	0,0005041	0,0002363
89	86	0,00001	0,00001	248	246	0,0005041	0,0002363
90	87	0,00001	0,00001	249	247	0,00001	0,00001
91	88	0,000189038	9,45188E-05	250	248	0,000488347	0,0002205
92	89	0,00113423	0,0005041	251	249	0,000346569	0,0001575
93	90	3,15063E-05	6,30125E-05	252	250	0,000472594	0,0002205
94	92	0,000330816	0,000141778	253	250	0,000614372	0,0002836
95	92	0,00220544	0,0010082	254	253	0,000913681	0,0004253
96	93	0,00001	0,00001	255	254	0,000519853	0,0002363
97	93	0,000110272	0,000220544	256	254	0,00105546	0,0004883
98	94	0,000960941	0,000425334	257	255	0,000425334	0,0002048
99	96	0,000283556	0,000126025	1001	1000	7,87656E-05	0,0001575
100	97	6,30125E-05	0,000126025	1002	1001	0,00001	0,00001
101	97	6,30125E-05	0,000126025	1003	1002	0,000693138	0,0013863
102	97	0,000236297	0,000472594	1004	1003	6,30125E-05	0,000126
103	98	0,000299309	0,000126025	1005	1004	0,000441088	0,0008979
104	98	0,00215818	0,000992447	1006	1004	0,00001	0,00001
105	100	9,45188E-05	0,000173284	1007	1005	0,000220544	0,0004568
106	101	0,000362322	0,000173284	1008	1006	0,000535606	0,0002521
107	101	0,000456841	0,000220544	1009	1007	0,000236297	0,0004726
108	101	1,57531E-05	3,15063E-05	1010	1007	0,000299309	0,0001418
109	102	9,45188E-05	0,000189038	1011	1008	0,000567113	0,0002521
110	104	0,00200065	0,000913681	1012	1008	0,00025205	0,0001103
111	105	0,00001	0,00001	1013	1009	0,000173284	0,0002363
112	105	0,000110272	0,000204791	1014	1009	6,30125E-05	0,0001418

Tabela 27 – Continuação dos dados das linhas do sistema de 476 barras

De	Para	R (pu)	X (pu)	De	Para	R (pu)	X (pu)
113	106	0,000535606	0,00025205	1015	1012	0,000204791	9,452E-05
114	106	0,00001	0,00001	1016	1012	0,000157531	7,877E-05
115	107	0,00001	0,00001	1017	1012	0,000897928	0,0004096
116	108	0,00001	0,00001	1018	1014	0,000110272	0,0002205
117	111	3,15063E-05	7,87656E-05	1019	1014	9,45188E-05	4,726E-05
118	112	0,00001	0,00001	1020	1015	0,00001	0,00001
119	112	7,87656E-05	0,000157531	1021	1015	0,00111847	0,0005199
120	113	0,00001	0,00001	1022	1018	0,000315063	0,0006301
121	114	0,000456841	0,000220544	1023	1019	0,00001	0,00001
122	115	0,0005041	0,000236297	1024	1020	0,000173284	7,877E-05
123	116	3,15063E-05	6,30125E-05	1025	1022	9,45188E-05	0,0002048
124	118	0,000299309	0,000141778	1026	1023	0,000409581	0,000189
125	119	0,00001	0,00001	1027	1025	0,00001	0,00001
126	120	0,000567113	0,00025205	1028	1026	0,000488347	0,0002205
127	122	0,00155956	0,000724644	1029	1027	9,45188E-05	0,000189
128	123	3,15063E-05	6,30125E-05	1030	1029	0,000126025	7,877E-05
129	125	7,87656E-05	0,000157531	1031	1029	9,45188E-05	0,0002048
130	126	0,000582866	0,000267803	1032	1030	0,00001	0,00001
131	127	0,00121299	0,000551359	1033	1031	0,000204791	0,0004096
132	127	0,000472594	0,000220544	1034	1032	0,000141778	9,452E-05
133	128	4,72594E-05	9,45188E-05	1035	1033	4,72594E-05	9,452E-05
134	128	0,00001	0,00001	1036	1034	0,000220544	0,0001418
135	129	0,000630125	0,000283556	1037	1036	1,57531E-05	3,151E-05
136	129	0,000409581	0,000834916	1038	1037	4,72594E-05	9,452E-05
137	130	0,000535606	0,00025205	1039	1037	1,57531E-05	3,151E-05
138	132	0,00001	0,00001	1040	1038	0,00001	0,00001
139	134	0,000519853	0,000220544	1041	1039	9,45188E-05	6,301E-05
140	135	0,00001	0,00001	1042	1040	0,000126025	0,0002521
141	136	9,45188E-05	0,000173284	1043	1040	0,000126025	0,0002521
142	137	0,000362322	0,000472594	1044	1041	9,45188E-05	0,0001733
143	138	0,000330816	0,000157531	1045	1042	0,000110272	0,0002048
144	139	0,00001	0,00001	1046	1045	0,00001	0,00001
145	140	0,000472594	0,000220544	1047	1046	9,45188E-05	0,000189
146	141	0,000141778	0,000299309	1048	1047	9,45188E-05	0,000189
147	141	0,00001	0,00001	1049	1048	0,000126025	0,0002521
148	142	0,000157531	0,000220544	1050	1049	0,000126025	0,0002521
149	144	0,000173284	7,87656E-05	1051	1050	7,87656E-05	0,0001733
150	145	0,000519853	0,000236297	1052	1051	0,000157531	0,0003308

Tabela 28 – Continuação dos dados das linhas do sistema de 476 barras

De	Para	R (pu)	X (pu)	De	Para	R (pu)	X (pu)
151	146	0,000488347	0,000992447	1053	1052	7,87656E-05	0,0001575
152	146	0,00102395	0,000472594	1054	1053	0,00001	0,00001
153	147	0,000315063	0,000141778	1055	1054	0,000189038	0,0003938
154	148	0,000472594	0,000220544	1056	1055	6,30125E-05	0,0001103
155	150	0,00001	0,00001	1057	1055	4,72594E-05	9,452E-05
156	150	0,00141778	0,000661631	1058	1055	0,000157531	0,0003308
157	151	0,000693138	0,000315063	1059	1056	0,000110272	0,0002048
158	151	0,000110272	4,72594E-05	1060	1058	0,00001	0,00001
159	151	1,57531E-05	3,15063E-05	1061	1060	0,000346569	0,0006931
1062	1061	7,87656E-05	0,000141778	1144	1136	6,30125E-05	4,726E-05
1063	1062	7,87656E-05	0,000173284	1145	1136	0,000220544	0,0001575
1064	1063	0,000141778	0,000299309	1146	1138	0,000567113	0,0002521
1065	1063	0,00001	0,00001	1147	1139	0,000409581	0,000189
1066	1064	3,15063E-05	4,72594E-05	1148	1140	0,000110272	0,0002205
1067	1065	4,72594E-05	3,15063E-05	1149	1140	0,00001	0,00001
1068	1066	9,45188E-05	0,000189038	1150	1142	7,87656E-05	0,0001418
1069	1068	0,00001	0,00001	1151	1144	0,00001	0,00001
1070	1069	0,000110272	0,000204791	1152	1145	0,00001	0,00001
1071	1070	0,000110272	0,000204791	1153	1146	0,000519853	0,0002363
1072	1071	0,00001	0,00001	1154	1146	0,000740397	0,0003308
1073	1071	0,000425334	0,000850669	1155	1147	0,00001	0,00001
1074	1072	0,000330816	0,000141778	1156	1149	0,000315063	0,0001418
1075	1073	1,57531E-05	3,15063E-05	1157	1150	0,000126025	0,0002521
1076	1073	1,57531E-05	4,72594E-05	1158	1150	7,87656E-05	0,0001575
1077	1073	7,87656E-05	0,000173284	1159	1150	0,000157531	0,0003151
1078	1074	0,00001	0,00001	1160	1151	0,000283556	0,000126
1079	1075	0,00001	0,00001	1161	1152	0,000267803	0,0001733
1080	1076	0,00001	0,00001	1162	1155	0,000362322	0,0001733
1081	1077	0,000141778	0,000283556	1163	1157	0,00001	0,00001
1082	1077	0,000173284	0,000362322	1164	1159	0,000661631	0,0002993
1083	1077	1,57531E-05	3,15063E-05	1165	1159	0,000189038	0,0003938
1084	1078	0,000299309	0,000141778	1166	1161	0,000157531	9,452E-05
1085	1079	9,45188E-05	0,000189038	1167	1161	0,000409581	0,0002678
1086	1080	0,000378075	0,000157531	1168	1161	0,00025205	0,0004883
1087	1081	0,00001	0,00001	1169	1163	6,30125E-05	0,0001103
1088	1082	0,00001	0,00001	1170	1164	0,00001	0,00001
1089	1085	0,000283556	0,000126025	1171	1168	0,000236297	0,0004883
1090	1086	0,000378075	0,000157531	1172	1168	0,00001	0,00001

Tabela 29 – Continuação dos dados das linhas do sistema de 476 barras

De	Para	R (pu)	X (pu)	De	Para	R (pu)	X (pu)
1091	1086	0,00001	0,00001	1173	1169	4,72594E-05	9,452E-05
1092	1087	7,87656E-05	0,000157531	1174	1170	0,000425334	0,0002048
1093	1088	7,87656E-05	0,000173284	1175	1171	0,000157531	0,0003151
1094	1089	0,00001	0,00001	1176	1172	0,000299309	0,0001418
1095	1091	0,000346569	0,000157531	1177	1173	0,00001	0,00001
1096	1092	0,000330816	0,000661631	1178	1173	0,000157531	0,0002993
1097	1092	0,00001	0,00001	1179	1174	0,00204791	0,0009452
1098	1093	9,45188E-05	0,000173284	1180	1177	0,000378075	0,0001733
1099	1094	0,000189038	7,87656E-05	1181	1178	0,000267803	0,000126
1100	1096	0,000110272	0,000204791	1182	1178	1,57531E-05	3,151E-05
1101	1096	0,00001	0,00001	1183	1179	0,000472594	0,0002205
1102	1097	0,000283556	0,000126025	1184	1179	0,00001	0,00001
1103	1098	4,72594E-05	0,000110272	1185	1182	4,72594E-05	7,877E-05
1104	1098	0,000630125	0,000283556	1186	1182	0,000110272	4,726E-05
1105	1100	0,000220544	0,000157531	1187	1182	0,000819163	0,0003781
1106	1101	0,000126025	6,30125E-05	1188	1183	0,00103971	0,0004726
1107	1103	7,87656E-05	3,15063E-05	1189	1184	0,000299309	0,0001418
1108	1103	0,00163833	0,00075615	1190	1185	0,000299309	0,0001418
1109	1103	9,45188E-05	0,000189038	1191	1185	0,000315063	0,0001418
1110	1105	0,000110272	7,87656E-05	1192	1185	0,00025205	0,0005041
1111	1105	0,00001	0,00001	1193	1186	0,00001	0,00001
1112	1107	0,00001	0,00001	1194	1190	0,00001	0,00001
1113	1109	0,00001	0,00001	1195	1191	0,00001	0,00001
1114	1110	0,000110272	7,87656E-05	1196	1193	0,000472594	0,0002205
1115	1111	0,000598619	0,000267803	1197	1194	0,00170134	0,0007877
1116	1112	0,000236297	0,000110272	1198	1195	0,00176435	0,0008034
1117	1113	7,87656E-05	0,000173284	1199	1196	0,000441088	0,0002048
1118	1114	0,000315063	0,000141778	1200	1197	0,000283556	0,000126
1119	1114	6,30125E-05	3,15063E-05	1201	1197	0,000299309	0,0001418
1120	1116	0,000456841	0,000220544	1202	1197	0,000315063	0,0001418
1121	1116	0,00001	0,00001	1203	1198	9,45188E-05	4,726E-05
1122	1117	0,000267803	0,000535606	1204	1198	0,00148079	0,0006774
1123	1117	0,000126025	0,00025205	1205	1200	0,000425334	0,0002048
1124	1117	1,57531E-05	3,15063E-05	1206	1200	0,000488347	0,0002205
1125	1118	0,000173284	7,87656E-05	1207	1201	0,00001	0,00001
1126	1118	0,00001	0,00001	1208	1202	0,000330816	0,0001418
1127	1119	0,00001	0,00001	1209	1203	0,000441088	0,0002048
1128	1120	0,0012445	0,000567113	1210	1203	0,00141778	0,0006616

Tabela 30 – Continuação dos dados das linhas do sistema de 476 barras

De	Para	R (pu)	X (pu)	De	Para	R (pu)	X (pu)
1129	1121	0,00025205	0,000110272	1211	1205	0,000409581	0,000189
1130	1122	0,000110272	0,000220544	1212	1206	0,0005041	0,0002521
1131	1122	0,00001	0,00001	1213	1207	0,000362322	0,0001733
1132	1123	6,30125E-05	0,000126025	1214	1208	0,000488347	0,0002205
1133	1124	0,000519853	0,000236297	1215	1209	0,00001	0,00001
1134	1125	0,00001	0,00001	1216	1213	0,00025205	0,0001103
1135	1126	0,000315063	0,000141778	1217	1215	0,000141778	6,301E-05
1136	1127	0,000141778	9,45188E-05	1218	1216	0,000299309	0,0001418
1137	1128	0,000740397	0,000330816				
1138	1128	0,000267803	0,000126025				
1139	1128	0,00137052	0,000630125				
1140	1130	0,000110272	0,000220544				
1141	1131	0,000346569	0,000157531				
1142	1132	0,00001	0,00001				
1143	1134	0,000141778	6,30125E-05				