



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

THOMPSON NERY HORA

RECONFIGURAÇÃO E ALOCAÇÃO ÓTIMA DE REGULADORES DE TENSÃO EM
REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO O ALGORITMO COLÔNIA
DE FORMIGAS

Salvador
Abril/2019

THOMPSON NERY HORA

RECONFIGURAÇÃO E ALOCAÇÃO ÓTIMA DE REGULADORES DE TENSÃO EM
REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO O ALGORITMO COLÔNIA
DE FORMIGAS

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal da Bahia,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Prof. Niraldo Roberto Ferreira, D. Sc.
Orientador

Salvador
Abril/2019

Hora, Thompson Nery

Reconfiguração e alocação ótima de reguladores de tensão em redes elétricas de distribuição utilizando o algoritmo colônia de formigas / Thompson Nery Hora. -- Salvador, 2019.

106 f. : il

Orientador: Prof. Dr. Niraldo Roberto Ferreira.

Dissertação (Mestrado - Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica) -- Universidade Federal da Bahia, Universidade Federal da Bahia - Escola Politécnica, 2019.

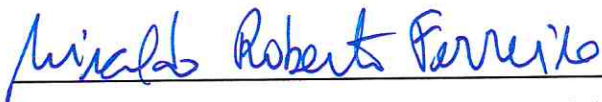
1. Reconfiguração de redes elétricas de distribuição. 2. Alocação ótima de reguladores de tensão. 3. Método da soma de potências. 4. Perdas mínimas. 5. Algoritmo colônia de formigas. I. Ferreira, Prof. Dr. Niraldo Roberto. II. Título.

THOMPSON NERY HORA

RECONFIGURAÇÃO E ALOCAÇÃO ÓTIMA DE REGULADORES DE TENSÃO EM REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO O ALGORITMO COLÔNIA DE FORMIGAS

Dissertação de Mestrado apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica do curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia.

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Niraldo Roberto Ferreira – Orientador

UFBA

APROVADO



Prof. Dr. André Pires Nóbrega Tahin

UFBA

Aprovado



Prof^a. Dr^a. Alessandra Freitas Picanço

IFBA

Aprovado.

Salvador, Bahia, 17 de abril de 2019

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me dado forças e determinação para chegar ao final de mais uma jornada importante na minha vida.

Aos meus pais, pelo incentivo a sempre buscar novos conhecimentos.

À minha esposa e filha, por terem paciência e entendimento nos momentos de priorização dos estudos.

Ao Prof. Dr. Niraldo Roberto Ferreira pela orientação.

Aos colegas do curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pelas noites, finais de semana e feriados de estudos e desenvolvimento.

RESUMO

A reconfiguração de sistemas elétricos de distribuição radial, que consiste na técnica de modificar a topologia da rede por meio da abertura e/ou fechamento de chaves, e a alocação de reguladores de tensão, são ferramentas importantes para o planejamento e operação de redes de distribuição, com o objetivo de minimizar as perdas de potência ativa do sistema. Esta técnica pode ser interpretada como um problema de programação não linear, devido a sua natureza discreta e combinatória. A explosão combinatorial de possíveis soluções para esses problemas, ocorre com o aumento da quantidade de barras e do número de chaves manobráveis, causando um elevado tempo de processamento de algoritmos e esforço computacional, tornando-se pouco atraente resolvê-los pelo método clássico de otimização, dando espaço à técnicas heurísticas e metaheurísticas. Nesse trabalho, apresenta-se uma metodologia para solucionar problemas de reconfiguração e alocação ótima de reguladores de tensão em redes de distribuição radial, trifásicas, balanceadas e em regime permanente, com o intuito de minimizar o valor das perdas ativas, sem violar as restrições operacionais, utilizando o Algoritmo de Formigas. Para o problema de reconfiguração e alocação de reguladores de tensão, algoritmos são apresentados baseados em Otimização por Colônia de Formigas ou *Ant Colony Optimization* (ACO), na variante do *Ant Colony System* (ACS) no método de calcular a função objetivo, e na informação heurística utilizada pelas formigas na construção de uma solução. Para o ajuste de TAP, o método da soma de potência é adaptado para se obter um melhor desempenho e qualidade nas soluções. São apresentados testes realizados em sistemas de 16, 33, e 70 barras para avaliar a eficiência e robustez da metodologia proposta. O trabalho obteve resultados satisfatórios, apresentando redução significativa das perdas ativas e melhoria dos perfis de tensão dos sistemas testados, contribuindo para a aplicação do algoritmo colônia de formigas como ferramenta para a solução desses tipos de problemas.

Palavras-chave: Reconfiguração; Rede de Distribuição Radial; Alocação de Reguladores de Tensão; Algoritmo Colônia de Formigas; Perdas Mínimas; *Ant System*; *Ant Colony System*; Método da Soma de Potência; Fluxo de Potência.

ABSTRACT

The reconfiguration of radial distribution electrical systems, technique of modifying the network topology by opening and / or closing switches, and voltage regulators location, are important tools for planning and operation of distribution networks, with the aim of minimizing active power losses of the system. This technique can be interpreted as a nonlinear programming problem, difficult to solve due to its discrete and combinatorial nature. The combinatorial explosion of possible solutions to these problems occurs with the increase in the number of buses and the number of maneuverable switches, causing a high processing time of algorithms and computational effort, making it unattractive to solve them by the classic optimization method, giving space to heuristic and metaheuristic techniques. In this work, a methodology is presented to solve problems of reconfiguration and optimal voltage regulators location in radial, three-phase, balanced and permanent regime networks, in order to minimize active losses values, without violating the operational restrictions, using the Ants Algorithm. For the reconfiguration and voltage regulators placement problems, algorithms are presented based on Ant Colony Optimization (ACO), on the Ant Colony System (ACS) variant in the method of calculating the objective function, and in the heuristic information, used by the ants in the construction of a solution. For the TAP adjustment, the power summation method is adapted to improve the performance and quality of the solutions. We present tests performed in systems of 16, 33, and 70 buses to evaluate the efficiency and robustness of the proposed methodology. The work obtained satisfactory results, presenting a significant reduction of active losses and voltage profiles improvement by the tested systems, contributing to the application of the ant colony algorithm as a tool to solve these types of problems.

Keywords: Reconfiguration; Radial Distribution Networks; Voltage Regulators Placement; Ant Colony Algorithm; Minimum Losses; Ant System; Ant Colony System; Power Sum Method; Load Flow.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	21
1.2	MOTIVAÇÃO	22
1.3	OBJETIVOS.....	23
1.3.1	<i>Geral</i>	23
1.3.2	<i>Específicos</i>	23
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	24
2	REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1	RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO	25
2.2	MÉTODOS HEURÍSTICOS.....	25
2.2.1	<i>Metaheurística</i>	26
2.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
3	ALGORITMO COLÔNIA DE FORMIGAS	31
3.1	INTRODUÇÃO.....	31
3.2	COMPORTAMENTO DAS FORMIGAS	31
3.3	OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS.....	33
3.3.1	<i>Regra da Transição de Estados (Atualização Local/Global)</i>	34
4	FLUXO DE CARGA	37
4.1	MÉTODO DA SOMA DE POTÊNCIAS	38
4.1.1	Modelo de Rede de Distribuição Radial.....	39
4.1.2	Formulação Matemática do Método.....	40
4.1.3	MSP adaptado à redes de distribuição com reguladores de tensão	48
5	ALGORITMO DE FORMIGAS NA RECONFIGURAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	54
5.1	INTRODUÇÃO.....	54
5.2	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	54

5.3	ESCOLHA PSEUDO-ALEATÓRIA DAS LIGAÇÕES NO PERCURSO DAS FORMIGAS	56
5.4	INFORMAÇÃO HEURÍSTICA NO PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO	58
5.5	DISTRIBUIÇÃO DO FEROMÔNIO	58
5.6	RESOLUÇÃO DO PROBLEMA COM O ALGORÍTMO DE FORMIGAS	59
6	ALGORÍTMO COLÔNIA DE FORMIGAS NA ALOCAÇÃO DE REGULADORES DE TENSÃO.....	61
6.1	INTRODUÇÃO	61
6.2	REGULADORES DE TENSÃO	61
6.3	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	63
6.4	ALGORÍTMO COLÔNIA DE FORMIGAS NA ALOCAÇÃO DE REGULADORES DE TENSÃO	64
7	TESTES E RESULTADOS	70
7.1	INTRODUÇÃO	70
7.2	RECONFIGURAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	70
7.2.1	<i>Sistema de 16 barras</i>	71
7.2.2	<i>Sistema de 33 barras</i>	72
7.2.3	<i>Sistema de 70 barras</i>	74
7.3	ALOCAÇÃO DE REGULADORES DE TENSÃO	76
7.3.1	<i>Sistema de 16 barras</i>	77
7.3.2	<i>Sistema de 33 barras</i>	79
7.3.3	<i>Sistema de 70 barras</i>	81
7.4	ALOCAÇÃO DE REGULADORES DE TENSÃO APÓS A RECONFIGURAÇÃO.....	83
7.4.1	<i>Sistema de 16 barras</i>	83
7.4.2	<i>Sistema de 33 barras</i>	85
7.4.3	<i>Sistema de 70 barras</i>	88
7.5	COMPARATIVO DOS MÉTODOS IMPLEMENTADOS E SISTEMAS UTILIZADOS	90
7.5.1	<i>Sistema de 16 barras</i>	90
7.5.2	<i>Sistema de 33 barras</i>	91
7.5.3	<i>Sistema de 70 barras</i>	92

8 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	95
8.1 CONCLUSÕES	95
8.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
APÊNDICE A	103
DADOS DOS SISTEMAS TESTADOS.....	103
A1 Sistema de 16 barras	103
A2 Sistema de 33 barras	104
A4 Sistema de 70 barras	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Trajeto das formigas do formigueiro para a fonte de alimento	32
Figura 4.1 – Trecho de um sistema de distribuição	39
Figura 4.2 – Diagrama fasorial de um trecho da rede de distribuição	44
Figura 4.3 – Funcionamento do MSP	46
Figura 4.4 – Fluxograma – Método prático de alocação de RT	51
Figura 4.5 – Configuração inicial para o sistema de 33 barras.....	52
Figura 4.6 – Perfis de tensão para o sistema de 33 barras (Com RT e sem RT).....	53
Figura 5.1 – Probabilidade de escolha das ligações	56
Figura 5.2 – Estado dos nós e das ligações.....	57
Figura 6.1 – Alimentador de distribuição – (com e sem RT)	62
Figura 6.2 – Ligação – Elevação de tensão	62
Figura 6.3 – Ligação – Redução de tensão.....	63
Figura 6.4 – Matriz de Feromônio	65
Figura 6.5 – Espaço de Busca (Alocação de RT).....	68
Figura 7.1 – Sistema de 16 barras – Configuração inicial	71
Figura 7.2 – Sistema de 16 barras – Perfis de Tensão (inicial e final)	72
Figura 7.3 – Sistema de 33 barras - Configuração inicial.....	73
Figura 7.4 – Sistema de 33 barras – Perfis de Tensão (inicial e final)	74
Figura 7.5 – Sistema de 70 barras - Configuração inicial.....	75
Figura 7.6 – Sistema de 70 barras – Perfis de Tensão (inicial e final)	76
Figura 7.7 – Sistema de 16 barras – Perdas ativas (1 RT e 2 RTs)	77
Figura 7.8 – Sistema de 16 barras (1 RT) – Perfil de Tensão (inicial e final)	78
Figura 7.9 – Sistema de 16 barras (2 RTs) – Perfil de Tensão (inicial e final).....	78
Figura 7.10 – Sistema de 33 barras – Perdas ativas (1 RT e 2 RTs)	79
Figura 7.11 – Sistema de 33 barras (1 RT) – Perfil de Tensão (inicial e final)	80
Figura 7.12 – Sistema de 33 barras (2 RTs) – Perfil de Tensão (inicial e final).....	80
Figura 7.13 – Sistema de 70 barras – Perdas ativas (1 RT e 2 RTs)	81
Figura 7.14 – Sistema de 70 barras (1 RT) – Perfil de Tensão (inicial e final)	82
Figura 7.15 – Sistema de 70 barras (2 RTs) – Perfil de Tensão (inicial e final).....	82
Figura 7.16 – Sistema de 16 barras – Perdas ativas (1 RT e 2 RTs)	84
Figura 7.17 – Sistema de 16 barras (1 RT) – Perfil de Tensão (inicial e final)	84

Figura 7.18 – Sistema de 16 barras (2 RTs) – Perfil de Tensão (inicial e final)	85
Figura 7.19 – Sistema de 33 barras – Perdas ativas (1 RT e 2 RTs)	86
Figura 7.20 – Sistema de 33 barras (1 RT) – Perfil de Tensão (inicial e final).....	87
Figura 7.21 – Sistema de 33 barras (2 RTs) – Perfil de Tensão (inicial e final)	87
Figura 7.22 – Sistema de 70 barras – Perdas ativas (1 RT e 2 RTs)	88
Figura 7.23 – Sistema de 70 barras (1 RT) – Perfil de Tensão (inicial e final).....	89
Figura 7.24 – Sistema de 70 barras (2 RTs) – Perfil de Tensão (inicial e final)	89
Figura 7.25 – Sistema de 16 barras – Comparação das perdas ativas dos métodos de estudo aplicados.....	91
Figura 7.26 – Sistema de 33 barras – Comparação das perdas ativas dos métodos de estudo aplicados.....	92
Figura 7.27 – Sistema de 70 barras – Comparação das perdas ativas dos métodos de estudo aplicados.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Dados do Sistema de Distribuição.....	46
Tabela 4.2 – Resultado das iterações	48
Tabela 4.3 – Pontos de entrega ou conexão em tensão nominal superior a 1kV e inferior a 69kV	52
Tabela 4.4 – Sistema de 33 barras com alocação de RT	53
Tabela 7.1 – Parâmetros de entrada nas simulações do sistema de distribuição	70
Tabela 7.2 – Resultados obtidos para o sistema de 16 barras.....	71
Tabela 7.3 – Resultados obtidos para o sistema de 33 barras.....	73
Tabela 7.4 – Resultados obtidos para o sistema de 70 barras.....	75
Tabela 7.5 – Resultados obtidos para o sistema de 16 barras.....	77
Tabela 7.6 – Resultados obtidos para o sistema de 33 barras.....	79
Tabela 7.7 – Resultados obtidos para o sistema de 70 barras.....	81
Tabela 7.8 – Resultados obtidos para o sistema de 16 barras.....	83
Tabela 7.9 – Resultados obtidos para o sistema de 33 barras.....	86
Tabela 7.10 – Resultados obtidos para o sistema de 70 barras.....	88

LISTA DE ABREVIATÖES

ACO: *Ant Colony Optmization*

ACS: *Ant Colony System*

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

BC: Banco de Capacitores

CCEE: Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

EPE: Empresa de Pesquisa Energética

GD: Geração Distribuída

MSP: Método da Soma de Potências

MSP-RT: Método da Soma de Potência adaptado à redes de distribuição com reguladores de tensão

ONS: Operador Nacional do Sistema

RT: Regulador de Tensão

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A energia elétrica é essencial para o desenvolvimento da humanidade, e sua disponibilidade representa um incremento na qualidade de vida da população. Responsável pelo tráfego de energia, o sistema elétrico, precisa funcionar de maneira eficiente para atender todas as demandas fornecendo, de forma confiável, energia elétrica para a sociedade, com qualidade, continuidade e segurança.

Um sistema elétrico de potência é formado por três partes principais: A geração, onde estão os centros produtores que transformam diversas formas primárias de energia, em energia elétrica. A transmissão, que tem o papel de transportar a energia elétrica gerada nos centros produtores para as proximidades dos grandes centros consumidores. E a distribuição, pertencente ao nível mais baixo de tensão desse sistema, sendo responsável pela transferência da energia elétrica aos consumidores. As redes de distribuição originam-se nas subestações e operam normalmente em configuração radial.

Para um sistema de distribuição de energia elétrica operar de forma competitiva, é desejável aumentar sua eficiência, diminuindo o custo da operação do sistema. Para se obter este resultado, uma das formas é através da operação do sistema no estado de mínimas perdas, em que o sistema de distribuição apresenta um melhor perfil de tensão nas barras, que caracteriza uma melhor distribuição do fluxo de potência nas linhas, aumentando a confiabilidade do sistema e consequentemente a vida útil dos equipamentos instalados na rede.

As perdas de energia elétrica nos sistemas de distribuição podem ser minimizadas de diversas formas, podendo-se destacar: a reconfiguração da rede de distribuição elétrica, o recondutoramento total ou parcial do sistema, a alocação de equipamentos em pontos estratégicos da rede para a compensação de perdas, dentre outros. Comparando todas as técnicas citadas, para o recondutoramento do sistema de distribuição, o despendimento de novos recursos (material e mão de obra) o torna menos viável, se comparado à alocação de equipamentos: reguladores de tensão ou bancos capacitores, por apresentar um menor custo de implementação. A reconfiguração, dentre todas analisadas, é a técnica mais atrativa para a

concessionária de distribuição, pois permite a utilização de recursos já existentes no sistema. (PEREIRA, 2010).

Além da reconfiguração do sistema de distribuição, um adequado ajuste e alocação de equipamentos na rede de distribuição, como por exemplo: reguladores de tensão e/ou banco de capacitores, traz benefícios tanto para as distribuidoras de energia elétrica quanto para os consumidores, uma vez que reduzem as perdas ativas do sistema, melhorando o perfil de tensão da rede, mantendo os níveis de tensão adequados, sem variações, e fazendo com que os equipamentos operem corretamente, aumentando sua vida útil e consequentemente a satisfação dos clientes (SHORT, 2004). Ainda, evitam-se penalidades à concessionária caso os níveis de tensão estejam fora dos limites estabelecidos pelo órgão regulador ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) que regula e fiscaliza a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, através da Resolução ANEEL 505 de novembro de 2001, a qual “estabelece de forma atualizada e consolidada as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente”.

1.2 MOTIVAÇÃO

O setor elétrico brasileiro, após a sua reestruturação, aumentou o seu mercado competitivo dando incentivos aos investimentos privados o que exigiu do sistema elétrico de distribuição uma maior qualidade da energia entregue ao consumidor.

Diante de tal fato, as concessionárias de energia buscam operar o sistema de forma otimizada, tendo em vista reduções de custos, que podem ser alcançadas por meio da minimização de perdas técnicas e econômicas, de modo a garantir que a qualidade de fornecimento da energia e do serviço prestado estejam dentro dos limites estabelecidos pela ANEEL.

A aplicação da reconfiguração e alocação de reguladores de tensão, frente à este cenário do sistema elétrico de distribuição, leva a uma redução de perdas e melhoria na qualidade da energia. Esta nova configuração do sistema é encontrada no estado de mínimas perdas. Tanto a reconfiguração como a alocação de reguladores de tensão melhoram o perfil de tensão nas barras do sistema.

Cabe ressaltar, que a implementação do algoritmo de colônia de formigas pode ser aplicado ao problema de reconfiguração e alocação de reguladores de tensão.

Essa metaheurística é inspirada no comportamento real de formigas, que na procura de alimentos, sempre encontram o menor caminho entre o formigueiro e fontes de comidas utilizando um mecanismo de comunicação indireta (SOUZA, 2011).

A aplicação do algoritmo colônia de formigas na solução desse tipo de problema de mínimas perdas, existe em diversos trabalhos de pesquisa, até mesmo com alocação de banco de capacitores e geração distribuída. Porém, não foram encontrados na literatura, trabalhos utilizando a metaheurística colônia de formigas aplicada à alocação ótima de reguladores de tensão, apresentando dessa forma, um grande interesse acadêmico.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Geral

Diversos estudos científicos vêm sendo realizados de forma intensa para o controle de tensão em sistemas de distribuição visando a melhoria da qualidade de energia, e redução de custos.

Grande parte das pesquisas aplicam a reconfiguração como estudo primordial para minimização das perdas ativas pelo fato de apresentar um baixo custo devido a vantagem de utilização dos recursos existentes do sistema e, de forma a otimizar ainda mais as perdas do sistema, a alocação ótima de equipamentos na rede de distribuição como por exemplo: reguladores de tensão, banco de capacitores, geração ditribuída, dentre outros.

Esta dissertação tem como objetivo desenvolver uma ferramenta que resolva o problema de reconfiguração, alocação e ajustes ótimos de reguladores de tensão no sistema elétrico de distribuição primária, utilizando o algoritmo colônia de formigas, de modo a minimizar os desvios de tensão e as perdas ativas, e mantendo a tensão dentro dos limites estabelecidos na Resolução ANEEL 505. Assim como também propõe os seguintes objetivos específicos, conforme a seguir.

1.3.2 Específicos

Aplicar a metaheurística colônia de formigas, Ant Colony Optimization, na variante: Ant Colony System (ACS) para a solução do problema de reconfiguração e

alocação de reguladores de tensão em redes elétricas de distribuição. E uma adaptação ao método da soma de potência (MSP-RT) para o ajuste de TAP.

Analisar as perdas e fluxo de potência pelo método de soma de potência (MSP) para os sistemas elétricos de distribuição propostos.

Avaliar a diminuição das perdas ativas total após a reconfiguração, alocação de reguladores de tensão e ajuste de TAP.

Verificar o perfil de tensão nas barras a fim de garantir a qualidade de energia dentro dos limites estabelecidos pela ANEEL.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No segundo capítulo deste trabalho, é apresentado o referencial teórico da metaheurística e métodos heurísticos, metodologias que podem ser aplicadas na solução dos problemas de reconfiguração e alocação de reguladores de tensão em sistemas de distribuição, e revisão bibliográfica com os principais métodos aplicados.

A filosofia do comportamento das formigas, e o algoritmo colônia de formigas, utilizando a regra de transição de estados (Atualização Local/Global) como método de otimização, são apresentados no terceiro capítulo. Encontram-se, no capítulo 4, as principais metodologias relacionadas à sistemas de distribuição de energia elétrica, conceitos e método para resolução de fluxo de carga.

No capítulo 5, o método de Otimização por Colônia de Formigas e suas versões dos algoritmos são utilizados para resolver o problema de reconfiguração de redes elétricas de distribuição. No capítulo 6, é utilizado o algoritmo Colônia de Formigas na solução do problema de alocação de reguladores de tensão em redes de distribuição de energia elétrica. No capítulo 7, são apresentados os testes e resultados encontrados utilizando o algoritmo proposto nos sistemas de 16, 33 e 70 barras.

E, por fim, o capítulo 8 traz as conclusões e propostas para futuros trabalhos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO

A reconfiguração de redes de distribuição consiste na determinação da topologia radial através de manobras de abertura e fechamento das chaves de interligação instaladas ao longo dos alimentadores modificando a configuração de rede com a finalidade de redução das perdas técnicas atendendo aos requisitos de desempenho do sistema e a demanda de energia solicitada.

A prática da reconfiguração no sistema de distribuição era realizada através da experiência dos próprios operadores, após a reestruturação do setor elétrico na década de noventa, esta se tornou um desafio da engenharia, por se tratar de um problema de otimização não linear, de natureza combinatória, devido ao elevado número de alternativas para os estados das chaves de manobra (explosão combinatorial), e o caminho, na busca por soluções ótimas, é a utilização de softwares especializados.

A dimensão do problema está relacionada com o número de chaves manobráveis, na busca de uma configuração ótima. Dado um sistema com n chaves, existem 2^n possíveis configurações de posições de chaves (aberta e fechada) do sistema ou diferentes soluções (PEREIRA *et al.*, 2006).

Na resolução do problema de reconfiguração, algumas destas configurações não são permitidas, por não satisfazerem a restrição de radialidade, ou não são factíveis, por violarem restrições operacionais exigidos por equipamentos ou impostos pelos órgãos regulatórios.

2.2 MÉTODOS HEURÍSTICOS

Os métodos heurísticos são técnicas de procura por soluções de boa qualidade para problemas combinatoriais complexos com esforços computacionais razoáveis. Um problema pode ser considerado como sendo de alta complexidade matemática, quando o tamanho do problema cresce, e/ou quando existe grande dificuldade na exploração das possíveis soluções para encontrar a solução ótima global devido principalmente à característica da explosão combinatorial (SOUZA, 2011).

Diante da necessidade, ao longo do tempo, foram desenvolvidas técnicas que buscam encontrar soluções ótimas e de boa qualidade com certo esforço computacional, porém sem a necessidade de se realizar uma busca exaustiva dentro do espaço de soluções factíveis. Logo, os métodos heurísticos são utilizados, pois apresentam uma boa relação entre os resultados gerados e o tempo computacional necessário para gerar estes resultados.

Os métodos heurísticos podem ser classificados em:

- Heurística construtiva (MELIÁN et al., 2003) – A solução de um problema é construída de forma incremental, passo a passo, escolhendo um componente que será inserido na solução, seguindo algum critério de classificação, até gerar uma solução completa e viável.
- Heurística de busca em vizinhança (MCDERMOTT et al, 1999) – partem de uma solução inicial viável qualquer na tentativa de melhorar esta solução através de operações de troca, remoção ou inserção, até que não seja mais possível a melhoria ou algum outro critério de parada seja satisfeito.
- Heurística híbridas (FRAGA, 2006) – Resultantes da combinação de duas ou mais heurísticas com estratégias diferentes.
- Metaheurística (OLIVEIRA, 2009) – Método heurístico utilizado para resolver, de forma genérica, problemas de otimização. Visa explorar inteligentemente a instância do problema e o seu espaço de soluções, evitando paradas prematuras em ótimos locais.

2.2.1 Metaheurística

Metaheurísticas são técnicas inteligentes para resolver, de forma genérica, problemas de otimização, com capacidade de sair de soluções ótimas locais e realizar uma busca robusta percorrendo de forma eficiente o espaço de busca, ou seja, encontrar uma solução de qualidade que gerencie uma interação entre as estratégias de busca local e as estratégias de nível superior, criando um processo de otimização (GLOVER *et al*, 2003).

Esses métodos utilizam a combinação de escolhas aleatórias e conhecimento dos históricos dos resultados adquiridos anteriormente pelo método para se guiarem na busca por uma solução no espaço da pesquisa e em suas vizinhanças, evitando assim paradas prematuras em ótimos locais. Dessa forma de exploração do espaço de soluções, podem ser classificados em duas categorias: a busca local, que é realizada através de movimentos aplicados sobre a solução atual, em busca de uma outra solução de melhor qualidade em sua vizinhança (ex; Busca Tabu, Busca Reativa, Têmpera Simulada), e a busca populacional, que armazena um conjunto de soluções de boa qualidade e as combinam de diversas formas, a fim de extrair bons atributos presentes em cada solução, e com essas informações, obter uma solução ainda melhor (ex; Algoritmos Genéticos, Colônia de Formigas, Nuvem de Partículas).

Têmpera Simulada (Simulated Annealing) – Técnica utilizada na construção de cristais perfeitos onde consiste em esquentar um material até temperaturas elevadas e à partir desse estado, o material é resfriado lentamente, adequadamente controlado, preservando o chamado quase equilíbrio termodinâmico até que o material atinja um estado de energia mínimo, transformando-se em um cristal perfeito.

Busca Tabu (Tabu Search) – Metaheurística de conhecimento existente no campo da otimização matemática com estratégia de busca inteligente percorrendo o espaço de busca de forma eficiente e seletiva. Nesse processo é fundamental integrar o processo de busca às estratégias de intensificação e de diversificação. Nesse contexto, intensificar significa realizar uma busca mais intensa em torno da solução corrente, por exemplo, aumentando o tamanho da vizinhança ou melhorando a qualidade da vizinhança. A busca se move a cada iteração no sentido de encontrar uma melhor solução vizinha, não aceitando movimentos que levem a soluções já visitadas por permanecerem armazenadas em uma lista tabu, guardando as soluções por um determinado espaço de tempo ou certo número de iterações, e como resultado final espera-se que se encontre um ótimo global ou próximo deste.

Algoritmo Genético – Metaheurística desenvolvida com aplicação para resolver, de forma intensa, problemas complexos no campo da pesquisa operacional. Para o desenvolvimento, encontrou-se semelhanças entre a forma de resolver um problema de otimização matemática e o processo de seleção natural e de evolução

das espécies. O algoritmo é dividido nas etapas de inicialização, avaliação, cruzamento, mutação, atualização e finalização. Basicamente, o Algoritmo Genético cria uma população de possíveis respostas para o problema a ser tratado, para depois submeter essa população ao processo de evolução natural e a evolução das espécies é a consequência de um processo de otimização estocástica que acontece em um determinado ambiente e em tempo real.

Nuvem de Partículas – A Otimização por Nuvem de Partículas (Particle Swarm Optimization) é uma metaheurística evolucionária que surgiu com a intenção de simular o comportamento de um conjunto de pássaros em vôo com seu movimento localmente aleatório, mas globalmente determinado. A procura pela melhor posição é a busca de uma solução “ótima” para o problema, sendo o conjunto de possíveis posições das partículas o espaço de busca do problema, e cada posição ocupada por uma partícula, uma possível solução do problema. O comportamento de cada partícula é baseado em sua própria experiência e na das outras partículas com as quais ela se relaciona.

Algoritmo de formigas – Metaheurística inspirada no comportamento de formigas reais, as quais conseguem descobrir os menores caminhos entre fontes de alimentos e o formigueiro sem o auxílio de pistas visuais. Esta busca é efetuada através da exploração das trilhas de feromônio, substância química depositada pelas formigas durante seu percurso. Devido a este comportamento cooperativo e eficaz de busca, elas vão construindo alternativas melhores no caminho para encontrar o alimento. Este comportamento foi então simulado em algoritmos de otimização, conhecidos como otimização por colônia de formigas (ACO, do inglês Ant Colony Optimization).

2.3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Com investimentos em pesquisas e a reestruturação do setor elétrico brasileiro, órgãos como: ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, ONS - Operador Nacional do Sistema, CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica e a EPE - Empresa de Pesquisa Energética buscaram melhorias na operação e planejamento do sistema elétrico. Métodos de otimização, como a redução de perdas

e de custos, foram explorados amplamente e aplicados em grande escala em diversas áreas do setor, trazendo para o sistema elétrico bons benefícios técnicos e econômicos.

Métodos inteligentes como: Busca Tabu, Algoritmos Genéticos, Têmpera Simulada, Nuvens de Partículas, Colônia de Formigas, dentre outros, conhecidos como metaheurísticas, tem sido estudados, através de pesquisas, e adaptados para solucionar este tipo de problema (ARROYO, 2002).

Na literatura encontram-se diversos trabalhos que utilizam as metaheurísticas aplicadas a problemas de reconfiguração e alocação de reguladores de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica.

Em (CHANG, 2008) aplica-se um algoritmo baseado na metaheurística colônia de formigas. A simulação do comportamento de uma colônia de formigas, em especial a maneira como são capazes de determinar o menor caminho para uma fonte de alimento, é utilizada para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição. No algoritmo proposto, formigas artificiais escolhem quais chaves devem ser abertas para formar uma topologia radial.

Em (SUGIMOTO et al., 2005), aplica-se um algoritmo de busca tabu com múltiplas funções para o controle e localização ótima de reguladores de tensão e compensadores estáticos em sistema de distribuição com a presença de geração distribuída. Neste método, primeiramente, o algoritmo é utilizado para alocar o regulador de tensão, depois posicionar o “tap” e por fim, localizar os compensadores estáticos para melhorar o perfil de tensão da rede, após a introdução de geração distribuída no sistema, minimizando os custos de investimento.

Em (MENDONZA et al., 2007), aplica-se um algoritmo genético, para definir a localização ótima de reguladores de tensão no sistema de distribuição de energia elétrica de modo a minimizar de forma simultânea as perdas totais de energia e os desvios de tensão no sistema através do processo de otimização de um problema multiobjetivo, obtendo as soluções ótimas, possibilitando um conjunto de possíveis soluções a serem escolhidas.

Em (FRANCO e ROMERO, 2010), apresentam-se a metaheurística de busca tabu para a alocação ótima de reguladores de tensão e capacitores, com o objetivo diminuir as perdas, e melhorar o perfil de tensão nas barras do sistema de distribuição de energia elétrica. Neste estudo, foi levado em conta o custo total de operação do sistema, assim como as restrições de operação. Após simulações e testes,

evidenciou-se que uma ação conjunta e integrada das duas alternativas permite uma operação com um custo menor, se comparada com a resposta obtida com cada alternativa atuando por separado.

Em (ALMEIDA et al., 2007), foram combinados dois Algoritmos Genéticos para resolver o problema de planejamento integrado de banco de capacitores e reguladores de tensão. Um para alocar bancos de capacitores, com objetivo de maximizar a economia com a redução das perdas, após alocação. E o outro alocar reguladores de tensão com o objetivo de minimizar custos para correção de desvio de tensão do alimentador. Após análises e resultados, a redução de perdas e correção do perfil de tensão, foram atendidos somente quando utilizou-se a combinação de banco de capacitores e reguladores de tensão.

3 ALGORITMO COLÔNIA DE FORMIGAS

3.1 INTRODUÇÃO

Fenômenos naturais como, reprodução, ciclo biológico, códigos genéticos, mudanças de estações, condições climáticas, comportamento das pessoas (instinto, pensamento humano), a forma de organização de algumas espécies (insetos), vêm interessando pesquisadores no mundo inteiro devido a sua grande complexidade e ordem.

Estes fenômenos que descrevem comportamentos presentes na natureza dependem de diversas variáveis e são de difícil entendimento. Esta complexidade vem atraindo estudiosos de modo que as pesquisas tomaram uma importância significativa no meio científico. Existe, atualmente, uma área específica de conhecimento voltada ao estudo de métodos e técnicas bio-inspiradas, em que estes modelos matemáticos baseados em fenômenos biológicos são aplicados em diversas áreas do conhecimento como física, engenharia, problemas de otimização, etc.

O comportamento e a organização dos insetos sociais é um dos fenômenos biológicos de maior interesse para esta pesquisa, onde insetos como abelhas, formigas, vespas e cupins, possuem um alto grau de organização, formando colônias com uma complexa estrutura social, com indivíduos ocupando funções bem definidas na sociedade, de modo a realizar tarefas extremamente complexas, como a construção de um habitat (colmeia, formigueiro e vespeiro), ou busca e transporte de alimentos de maneira organizada para a colônia (DORIGO; STUTZLE, 2004).

3.2 COMPORTAMENTO DAS FORMIGAS

No desenvolvimento das pesquisas, descobriu-se que certas espécies de formigas se comunicam, de forma indireta, através de uma substância química denominada feromônio. Na procura por alimentos, as formigas depositam este feromônio formando um rastro que é usado na marcação de caminhos no terreno, formando uma trilha.

Na tal trilha, as formigas são capazes de sentir o cheiro do feromônio, tendendo a escolher, probabilisticamente, caminhos com maiores concentrações de feromônio,

induzindo outras formigas a percorrerem o mesmo caminho até que tenham convergido para o ramo mais curto, conforme mostra a Figura 3.1 (SOUZA, 2009).

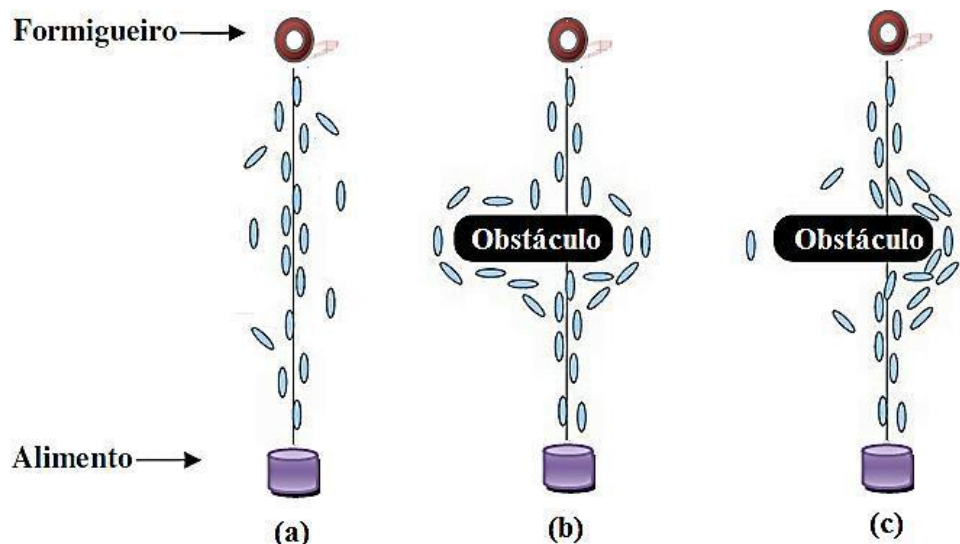


Figura 3.1 – Trajeto das formigas do formigueiro para a fonte de alimento

Na Figura 3.1 (a), inicialmente as formigas partem do formigueiro de forma aleatória em busca do alimento. Com o passar do tempo, elas passam a percorrer o menor caminho, uma linha reta. Uma vez que um obstáculo aparece como mostrado na Figura 3.1 (b), o caminho é interditado. As formigas não são capazes de seguir a trilha original em seus movimentos. Nesta situação, novamente as formigas partem de forma aleatória em busca de alimento. Depois de algum tempo o caminho mais curto terá uma maior quantidade de feromônio (devido ao fato de que as formigas que escolheram o caminho mais curto retornem primeiro, depositando feromônio no trajeto de ida e de volta), fazendo com que as demais formigas sigam esse caminho, como o mostra a Figura 3.1 (c), que é o menor caminho entre o formigueiro e a fonte de alimento. (SOUZA *et al*, 2009).

Com o decorrer do tempo, o feromônio, que é uma substância volátil, sofre um processo de evaporação, e a concentração vai diminuindo nos caminhos menos visitados, reduzindo consequentemente a atratividade desses ramos, assim como também, a influência desses caminhos nas decisões das formigas. A auto-organização presente nas colônias de insetos sociais é a ideia principal utilizada na implementação de algoritmos baseados em colônias de formigas.

3.3 OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIAS DE FORMIGAS

Inteligência coletiva é uma abordagem recente para a resolução de problemas através de comportamentos sociais de animais. A principal característica dos algoritmos baseados em inteligência coletiva é a utilização de agentes que cooperam através de comunicação indireta, executando movimentos no espaço de decisão. Por meio de modelos abstratos que imitam esse tipo de comportamento, diversas aplicações baseadas em inteligência coletiva são introduzidas nas mais variadas áreas do conhecimento. Em particular, diversos métodos e técnicas são inspirados no comportamento das formigas, denominada otimização por colônia de formigas (DORIGO, et al., 2004).

A otimização por colônia de formigas *Ant Colony Optimization* (ACO) é uma metaheurística usada para a busca de soluções de problemas combinatórios, inspirado no comportamento de formigas reais na busca por fontes de alimentos. Quando uma formiga precisa decidir o caminho a percorrer, ela usa informações de feromônio previamente depositado por outras formigas que passaram por aquele trajeto. Existem algumas diferenças e semelhanças com relação às formigas reais e artificiais, criadas para solucionar problemas de otimização via ACO:

- Ambas as formigas, reais ou artificiais, buscam o caminho mais curto na procura de alimentos, sendo que as reais, escolhem o menor caminho entre o ninho e a fonte de alimento, enquanto que as artificiais, buscam o menor caminho à depender do problema a ser otimizado.
- As formigas, tanto as reais como as artificiais, agem de modo cooperativo por meio da deposição e evaporação do feromônio.
- O feromônio depositado pelas formigas reais ou artificiais, modifica o meio ambiente, confirmando o aprendizado gerado pela formiga.
- A inteligência, nas formigas reais ou artificiais, é obtida de forma coletiva, pois o modo individual ou aleatório não é suficiente.

Destaca-se particularidades próprias das formigas artificiais (DORIGO et al., 1999):

- As formigas artificiais se deslocam de maneira discreta, enquanto que as formigas reais os movimentos são contínuos.
- O depósito de feromônio no ACO ocorre baseado na qualidade da solução encontrada.

- As formigas reais não possuem uma estrutura de memória que as impeçam de realizar movimentos, como no caso das artificiais.

Problemas de otimização podem ser de difícil solução e, o seu custo computacional cresce à medida que se aumenta o número de variáveis de entradas.

3.3.1 Regra da Transição de Estados (Atualização Local/Global)

Orientadas pela intensidade de feromônio, as formigas selecionam um caminho preferencial, e este, com a maior quantidade de feromônio, se torna a solução do problema. Esse conceito é a base para o desenvolvimento do algoritmo colônia de formigas. Primeiramente, cada formiga é alocada em um estado inicial, onde cada uma delas irá realizar um caminho completo partindo do estado inicial até o estado final por meio de repetidas aplicações da regra de transição de estados, construindo uma configuração radial para a rede elétrica.

Ao realizar uma trajetória, a formiga modifica a quantidade de feromônio no caminho percorrido por meio da regra de atualização local. Uma vez que todas as formigas terminam suas expedições a quantidade de feromônio é novamente modificada pela regra de atualização global (CHANG-FU, 2008). Nos tópicos à seguir, através de conceitos e equações matemáticas, será mostrado, de forma resumida, a regra transição de estados, a regra de atualização local e a regra de atualização global.

A regra de transição de estados, também chamada de regra aleatória proporcional, determina o passo a ser dado pela formiga em uma escolha pseudo-aleatória em que a formiga tem como base o seu conhecimento individual (informação heurística referente a ligação) e coletivo (quantidade de feromônio depositado pela formiga em cada uma dessas ligações), (DORIGO; STUTZLE, 2004).

A equação (1) calcula a probabilidade com que a formiga k posicionada no nó i escolhe mover-se para o nó j :

$$P_k(i, j) = \begin{cases} \frac{[\tau(i, j)]^\alpha \cdot [\eta(i, j)]^\beta}{\sum_{m \in jk(i)} [\tau(i, m)]^\alpha \cdot [\eta(i, m)]^\beta} & \text{Se } j \in jk(i) \\ 0, & \text{nos outros casos} \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

- $P_k(i, j)$ É a probabilidade de que a formiga k no nó i escolha mover-se para o nó j ;
- $\tau(i, j)$ É a quantidade de feromônio depositado sobre o ramo ij ;
- $\eta(i, j)$ É a informação heurística, um índice de atratividade do ramo ij ;
- α, β São os parâmetros de controle (fatores de escala), que determinam o peso relativo da influência da concentração de feromônio ou da informação prévia do problema. Se, por exemplo, $\alpha \gg \beta$, a quantidade de feromônio depositada é mais importante do que a informação prévia do problema na decisão dos agentes;
- $jk(i)$ É o conjunto de nós que podem ser visitados por uma formiga k posicionada no nó i .

Regra de Atualização Local

Na regra de atualização local, cada formiga, enquanto constrói sua trajetória, modifica a concentração de feromônio pela regra de atualização local. Como estratégia, o decaimento de feromônio tende a deixar a trajetória menos atrativa, fazendo com que a próxima formiga percorra caminhos diferentes, aumentando a variedade do espaço de busca. Esta regra é descrita matematicamente por:

$$\tau(i, j) = (1 - \rho) \cdot \tau(i, j) + \rho \tau_0 \quad (2)$$

Onde ρ é um parâmetro definido entre 0 e 1, que é o decaimento do feromônio, e τ_0 , é o valor inicial do feromônio.

Regra de Atualização Global

A regra de atualização global, é aplicada aos trechos pertencentes ao melhor caminho, quando as expedições são concluídas, e tem como objetivo fornecer maior quantidade de feromônio para trajetos mais curtos e com mais reforço de feromônio. Esta regra pode ser expressa matematicamente da seguinte forma:

$$\tau(i, j) = (1 - \rho) \cdot \tau(i, j) + \sigma \delta^{-1} \quad (3)$$

Em que δ é a distância da melhor turnê global desde o início da trilha, e $\sigma \in [0, 1]$ é o decaimento do feromônio.

Com essa regra, as formigas tendem a percorrer soluções próximas da melhor solução anterior o que torna a pesquisa mais selecionada, aumentando a probabilidade de encontrar a solução ótima. O problema de reconfiguração ótima de redes de distribuição, pode ser resolvido com algoritmo de formigas.

4 FLUXO DE CARGA

Fluxo de carga ou fluxo de potência é o processo que determina como a potência trafega pelas várias linhas desde os centros produtores até chegar aos consumidores. Ou seja, é um problema de transporte que consiste na resolução de várias equações não lineares (GUTTERRES, 2006).

Para a análise de sistemas elétricos, o cálculo do fluxo de potência tem fundamental importância. Nesse processo, são calculadas as potências ativa e reativa que fluem em cada linha, ou trecho dos alimentadores, assim como também as tensões das barras e as perdas nas linhas. Desse modo, o fluxo de carga se constitui em uma simulação da operação do sistema em regime permanente a partir da qual se pode saber:

- se as tensões estão dentro dos limites permitidos;
- se as perdas não são excessivas;
- qual o índice de estabilidade estática;
- qual o despacho mais econômico e mais seguro.

Ou seja, qual a coordenação ótima da geração sob os pontos de vista técnico e econômico.

Para o cálculo de fluxo de potência, utiliza-se o modelo estático da rede, podendo assim ser ignorados os efeitos transitórios. Para a modelagem do sistema são utilizados os circuitos equivalentes dos seus componentes.

O problema do fluxo de carga pode ser formulado como um sistema de equações e inequações algébricas não lineares que correspondem, respectivamente, às leis de Kirchhoff e a um conjunto de restrições operacionais da rede elétrica e de seus componentes. Estas não possuem soluções analíticas e a única maneira de resolvê-las é através de métodos iterativos. Um programa computacional de fluxo de potência pode ser utilizado como ferramenta adequada para resolver iterativamente as equações não lineares e estáticas da rede elétrica. (CESPEDES, 1990).

Vários métodos são utilizados para cálculo de fluxo de potência que podem ser encontrados na literatura. Os mais empregados são os métodos de Gauss Seidel e de Newton Raphson. O primeiro, devido a sua simplicidade e o segundo devido a sua eficiência e robustez, alcançando os resultados com poucas iterações, tornando-se o método mais utilizado, dependendo da qualidade da estimativa inicial. Entretanto,

foram desenvolvidos para sistemas de transmissão em alta tensão de baixa relação r/x . Porém, para sistemas de distribuição, em alguns casos, esses métodos podem apresentar problemas de convergência ou se tornarem ineficientes devido à particularidades como a alta relação entre a resistência e a reatância da linha (r/x) e a configuração preferencialmente radial (PEREIRA, 2010).

Em sistemas de distribuição de energia elétrica, tanto na reconfiguração como na alocação ótima de reguladores de tensão, ou resolvendo simultaneamente ambos os problemas, visa-se reduzir as perdas do sistema. Para calcular estas perdas, e o perfil de tensão, um programa de fluxo de potência adequado para sistemas de distribuição deve ser utilizado.

Para redes de distribuição, duas metodologias são muito utilizadas no desenvolvimento de métodos eficientes para o cálculo do fluxo de potências. A primeira se refere a modificações do método de Newton (e suas versões) e a segunda são os métodos baseados na varredura direta reversa (Back-Forward-Sweep) (PEREIRA, 2010).

Os cálculos de fluxo de carga caracterizam-se como um problema não linear e deve ser resolvido por meio de métodos numéricos iterativos. Para o desenvolvimento deste trabalho será utilizado o Método da Soma de Potência (MSP) que é recomendado para sistemas radiais (BARBOSA, 1995).

4.1 MÉTODO DA SOMA DE POTÊNCIAS

O Método da Soma de Potências é muito utilizado no cálculo do fluxo de carga de redes elétricas com topologia radial, sendo estruturado com base em uma técnica de varredura direta e inversa (Back-Forward-Sweep).

No caminho inverso (Backward), partindo das barras terminais e terminando na barra fonte, as cargas e as perdas são somadas, enquanto que, usando o caminho direto (Forward), partindo da barra fonte e terminando na barra terminal, tomadas duas a duas, o módulo das tensões nodais são calculadas através de uma equação biquadrada (de quarto grau).

Inicialmente, usando o caminho inverso, determina-se a potência equivalente para cada barra somando as potências referentes às cargas, incluindo a própria carga e as perdas de potência da linha que estão depois da barra de interesse,

concentrando o resultado nesta barra. Na primeira iteração as perdas não são levadas em consideração.

4.1.1 Modelo de Rede de Distribuição Radial

Para a formulação do modelo da rede de distribuição de energia, um sistema radial trifásico balanceado é frequentemente usado. Esse modelo assume que o sistema trifásico pode ser representado por um monofásico equivalente, representado por suas resistências e reatâncias (CESPEDES, 1990).

O nível de tensão de uma rede de distribuição de energia elétrica é determinado pela tensão na subestação e pelas quedas de tensão nas impedâncias das linhas, que variam com as flutuações nos níveis de consumo, e na tensão das subestações, oriundas do sistema de subtransmissão de alta tensão.

Uma linha de distribuição possui uma impedância que é inerente ao circuito, sendo, devido à resistência elétrica da linha (R) e as indutâncias e capacitâncias (L , C) distribuídas ao longo da linha. Em linhas de distribuição aéreas os efeitos das capacitâncias em derivação podem ser normalmente desprezados. O circuito equivalente de um trecho simplificado, portanto, pode ser representado conforme a Figura 4.1:

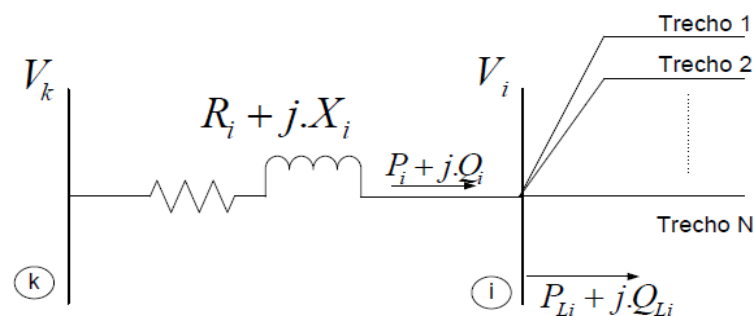


Figura 4.1 – Trecho de um sistema de distribuição

Na modelagem da rede de distribuição, o sistema é dividido em diversos ramos, os quais são limitados por nós ou barras. A Figura 4.1, apresenta o exemplo de um trecho de um sistema de distribuição radial, partindo de um nó k e chegando até o nó i , sendo que deste, partem N trechos. V_k e V_i são as tensões nas barras k e i , R_i e X_i são, respectivamente, a resistência e reatância série do trecho i . A carga existente em cada barra é representada por suas parcelas ativa e reativa (P_{Li} e Q_{Li}).

O fluxo de potência no trecho $(P_i + jQ_i)$, é o que circula no sistema até o seu nó terminal, sem considerar as perdas do trecho $(\Delta P_i$ e $\Delta Q_i)$. Esse é o fluxo de potência que chega ao final do trecho, já descontadas as perdas do fluxo de potência no início do trecho.

4.1.2 Formulação Matemática do Método

Ao considerar o trecho da rede de distribuição da Figura 4.1, e supondo o desenvolvimento para se encontrar o módulo da tensão V_i , o resultado, como descrito anteriormente, será uma equação fundamental do Método da Soma de Potência, bi-quadrada, de solução direta. O cálculo dos ângulos de fase dos fasores de tensão na barra pode ser feito a partir de outra expressão desacoplada do cálculo do módulo da tensão.

$$S = V_i \cdot I^* = P + jQ \quad (4)$$

Isolando-se a corrente I^* , esta será igual a:

$$I^* = \frac{(P + jQ)}{V_i} \quad (5)$$

A corrente I^* é o fasor corrente com o ângulo oposto ao da corrente. A corrente I desejada será:

$$I = \frac{(P - jQ)}{V_i^*} \quad (6)$$

Analisando a malha pela Lei de Kirchhoff das tensões, tem-se que a diferença entre a tensão no início da rede (V_k) e a tensão no final (V_i) é a queda de tensão na linha. Logo:

$$\Delta V = V_k - V_i = (R + jX) \cdot I \quad (7)$$

Repetindo a equação (7) e substituindo-se a expressão encontrada para a corrente na equação (6), tem-se que:

$$V_k - V_i = (R + jX).I \quad (8)$$

$$V_k - V_i = (R + jX). \frac{(P - jQ)}{V_i^*} \quad (9)$$

Passando, na equação (9), o V_i^* do membro direito para o esquerdo, tem-se:

$$\begin{aligned} V_k - V_i &= (R + jX). \frac{(P - jQ)}{V_i^*} \\ (V_k - V_i).V_i^* &= (R + jX).(P - jQ) \\ V_k.V_i^* - V_i.V_i^* &= (R + jX).(P - jQ) \end{aligned} \quad (10)$$

Fazendo-se o produto entre os fasores da equação (10) - multiplicação dos seus módulos e soma algébrica dos seus ângulos, tem-se:

$$\begin{aligned} |V_k|. |V_i| \angle(\theta_k - \theta_i) - |V_i|^2 \angle(\theta_i - \theta_i) &= (R + jX).(P - jQ) \\ |V_k|. |V_i| \angle(\theta_k - \theta_i) - |V_i|^2 &= (R + jX).(P - jQ) \end{aligned} \quad (11)$$

Prosseguindo com o desenvolvimento da equação (11), utilizando os conceitos da Identidade de Euler (função cosseno, par e função seno, ímpar):

$$\begin{aligned} e^{j\theta} &= \cos \theta + j \sin \theta \\ k.e^{j\theta} &= k.\cos \theta + j.k.\sin \theta \\ e^{-j\theta} &= e^{j(-\theta)} = \cos(-\theta) + j \sin(-\theta) = \cos \theta - j \sin \theta \\ k.e^{-j\theta} &= k.\cos \theta - j.k.\sin \theta \end{aligned}$$

E, por fim, a relação entre um fasor e a Identidade de Euler:

$$|V_k| \angle(\theta_k) = |V_k|. e^{j\theta_k}$$

Aplicando as definições acima à equação 11, obtém-se:

$$\begin{aligned} |V_k|. |V_i|. e^{j(\theta_k - \theta_i)} - |V_i|^2 &= |V_k|. |V_i|. [\cos(\theta_k - \theta_i) + j \sin(\theta_k - \theta_i)] - |V_i|^2 \\ &= (R + jX). (P - jQ) \end{aligned}$$

$$|V_k|. |V_i|. [\cos(\theta_k - \theta_i) + j \sin(\theta_k - \theta_i)] - |V_i|^2 = (R + jX). (P - jQ) \quad (12)$$

Desenvolvendo a equação (12) nas partes real e imaginária e substituindo, no seu primeiro membro, o ângulo $(\theta_k - \theta_i)$ por δ , tem-se:

$$|V_k|. |V_i|. \cos(\delta) + j|V_k|. |V_i|. \sin(\delta) - |V_i|^2 = (P.R + Q.X) + j(P.X - Q.R) \quad (13)$$

Decompondo a equação (13) em duas, real e imaginária, resulta em:

$$\text{Parte Real:} \quad |V_k|. |V_i|. \cos(\delta) - |V_i|^2 = (P.R + Q.X) \quad (14)$$

$$\text{Parte Imaginária:} \quad |V_k|. |V_i|. \sin(\delta) = (P.X - Q.R) \quad (15)$$

Isolando o $\cos(\delta)$ na equação (14) e o $\sin(\delta)$ na equação (15), tem-se:

$$\cos(\delta) = \frac{(P.R + Q.X) + |V_i|^2}{|V_k|. |V_i|} \quad (16)$$

$$\sin(\delta) = \frac{(P.X - Q.R)}{|V_k|. |V_i|} \quad (17)$$

Fazendo-se nas equações (16) e (17) a Identidade Trigonométrica

$$\sin^2(\delta) + \cos^2(\delta) = 1$$

Obtém-se:

$$\left(\frac{(P.R + Q.X) + |V_i|^2}{|V_k|. |V_i|} \right)^2 + \left(\frac{(P.X - Q.R)}{|V_k|. |V_i|} \right)^2 = 1 \quad (18)$$

Ao utilizar a Identidade Trigonométrica que gera a equação (18), nota-se que a mesma fica independente do ângulo, sendo perceptível que será formada uma equação bi-quadrada em V_i . Desenvolvendo a equação (18), tem-se:

$$\begin{aligned} |V_i|^4 + 2. |V_i|^2. (P.R + Q.X) + (P.R - Q.X)^2 + (P.X)^2 - 2.PXQR + (Q.R)^2 \\ = (|V_k|. |V_i|)^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |V_i|^4 + 2. |V_i|^2. (P.R + Q.X) + (PR)^2 + \cancel{2.PRQX} + (QX)^2 + (P.X)^2 - \cancel{2.PXQR} + (Q.R)^2 \\ - (|V_k|. |V_i|)^2 = 0 \end{aligned}$$

Rearranjando a equação, evidenciando as variáveis de resistência e reatância (quadráticas), tem-se:

$$|V_i|^4 + 2. |V_i|^2. (P.R + Q.X) - (|V_k|. |V_i|)^2 + X^2. (P^2 + Q^2) + R^2. (P^2 + Q^2) = 0$$

E, isolando o termo duplo $(P^2 + Q^2)$, tem-se finalmente a equação biquadrada:

$$|V_i|^4 + 2. |V_i|^2. (P.R + Q.X) - (|V_k|. |V_i|)^2 + (X^2 + R^2). (P^2 + Q^2) = 0 \quad (19)$$

Isolando-se o termo $|V_i|^2$, simplificando em uma equação quadrada, tem-se:

$$|V_i|^4 - 2. \left(\frac{1}{2}. |V_k|^2 - P.R - Q.X \right). |V_i|^2 + (X^2 + R^2). (P^2 + Q^2) = 0 \quad (20)$$

A Equação 20 é da forma:

$$|V_i|^4 - 2.A|V_i|^2 + B = 0, \quad \text{onde:}$$

$$A = \left(\frac{1}{2} \cdot |V_k|^2 - P \cdot R - Q \cdot X \right) \quad e \quad B = (X^2 + R^2) \cdot (P^2 + Q^2)$$

Sua solução é dada pela fórmula de Báskara:

$$|V_i|^2 = \frac{2 \cdot A + \sqrt{4 \cdot A^2 - 4 \cdot B}}{2} = A + \sqrt{A^2 - B}$$

$$\text{Logo: } |V_i| = \sqrt{A + \sqrt{A^2 - B}}$$

Após ter encontrado $|V_i|$, as perdas no trecho da Figura 4.1, devido à impedância $Z=R+jX$, podem ser determinadas por meio das expressões que vem do diagrama fasorial do trecho em questão:

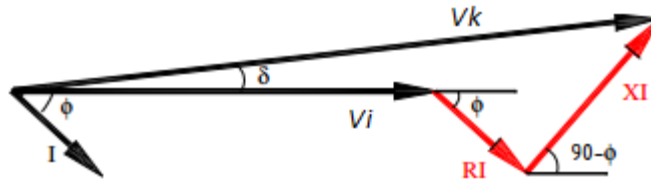


Figura 4.2 – Diagrama fasorial de um trecho da rede de distribuição

Para encontrar as perdas, é necessário obter a corrente do trecho, a qual pode ser determinada decompondo-se o fasor V_k em suas componentes horizontal e vertical, conforme a seguir:

$$\text{Horizontal: } |V_k| \cdot \cos(\delta) = |V_i| + R \cdot |I| \cdot \cos(\phi) + R \cdot |I| \cdot \sin(\phi)$$

$$\text{Vertical: } |V_k| \cdot \sin(\delta) = X \cdot |I| \cdot \cos(\phi) - R \cdot |I| \cdot \sin(\phi)$$

Uma vez obtido $|V_i|$, as potências ativa e reativa do final do trecho são dadas por:

$$P = |V_i| \cdot |I| \cdot \cos(\phi) \quad (21)$$

$$Q = |V_i| \cdot |I| \cdot \sin(\phi) \quad (22)$$

Somando as equações (21) e (22), elevadas ao quadrado, tem-se:

$$P^2 + Q^2 = |V_i|^2 \cdot |I|^2 \cdot \cos^2(\phi) + |V_i|^2 \cdot |I|^2 \cdot \sin^2(\phi) = |V_i|^2 \cdot |I|^2 \cdot [\cos^2(\phi) + \sin^2(\phi)]$$

$$P^2 + Q^2 = |V_i|^2 \cdot |I|^2$$

Isolando-se a corrente, tem-se que:

$$|I|^2 = \frac{P^2 + Q^2}{|V_i|^2} \quad (23)$$

Uma vez que as perdas no trecho (ativa e reativa), devido à resistência R e à reatância X (dados conhecidos do trecho da linha) são, respectivamente, $R \cdot |I|^2$ e $X \cdot |I|^2$ e que já se obteve $|I|^2$ na equação 23, suas expressões são dadas por:

$$\Delta P = R \cdot |I|^2 = R \cdot \left(\frac{P^2 + Q^2}{|V_i|^2} \right) \quad (24)$$

$$\Delta Q = X \cdot |I|^2 = X \cdot \left(\frac{P^2 + Q^2}{|V_i|^2} \right) \quad (25)$$

A perda de potência total do sistema é calculada somando as perdas nos diversos trechos.

Uma iteração se completa quando o procedimento descrito acima se repete para todas as barras e trechos do sistema. O processo iterativo do MSP converge quando o erro absoluto entre as perdas totais de uma iteração e da iteração precedente é menor que uma tolerância pré-estabelecida.

Para melhor entendimento do princípio de funcionamento do método da soma de potências apresentaremos o exemplo de um pequeno sistema de distribuição encontrado em (SOUZA, 2005), conforme Figura 4.3 e dados do sistema na Tabela 4.1. O problema consiste em determinar as tensões nas barras e a perdas em cada trecho.

Primeiramente calcula-se a tensão na barra 1 desprezando-se inicialmente todas as perdas. O fluxo compreendido entre as barras 0 e 1 é a soma de todas as cargas $P_1 = 1,76\text{MW}$ e $Q_1 = 1,32\text{MVAR}$.

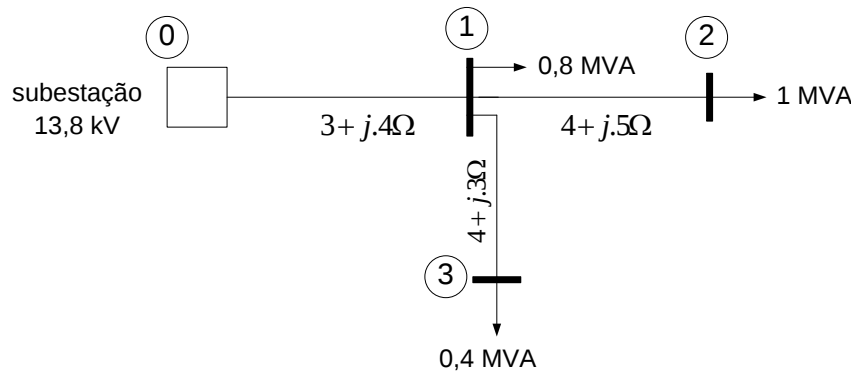


Figura 4.3 – Funcionamento do MSP – Exemplo de Sistema de Distribuição (SOUZA, 2005)

Tabela 4.1 - Dados do Sistema de Distribuição (SOUZA, 2005).

De	Para	R (Ω)	X(Ω)	P _L (MW)	Q _L (MVAR)
0	1	3	4	0,64	0,48
1	2	4	5	0,8	0,6
1	3	4	3	0,32	0,24
				1,76	1,32

Com o fluxo do trecho 1 calculado, as variáveis auxiliares podem ser calculadas:

$$A = \left(\frac{1}{2} \cdot |V_0|^2 - P_1 \cdot R_1 - Q_1 \cdot X_1 \right)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot |13,8|^2 - (1,76 \cdot 3 + 1,32 \cdot 4) = 84,66$$

$$B = (X_1^2 + R_1^2) \cdot (P_1^2 + Q_1^2)$$

$$= (4^2 + 3^2)(1,76^2 + 1,32^2) = 121$$

Resultando na tensão da barra 1, igual a:

$$V_1 = \sqrt{A + \sqrt{A^2 - B}}$$

$$= \sqrt{84,66 + \sqrt{84,66^2 - 121}} = 12,985 \text{ kV}$$

Obtendo a tensão na barra 1, pode-se calcular, de forma similar, as tensões nas demais barras. Cálculo da tensão na barra 2:

$$A = \left(\frac{1}{2} \cdot |V_1|^2 - P_2 \cdot R_2 - Q_2 \cdot X_2 \right)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot |12,985|^2 - (0,8 \cdot 4 + 0,6 \cdot 5) = 78,101$$

$$B = (X_2^2 + R_2^2) \cdot (P_2^2 + Q_2^2)$$

$$= (5^2 + 4^2)(0,8^2 + 0,6^2) = 41$$

$$V_2 = \sqrt{A + \sqrt{A^2 - B}}$$

$$= \sqrt{78,101 + \sqrt{78,101^2 - 41}} = 12,488 \text{ kV}$$

Para a primeira iteração 1, as perdas são corrigidas a partir das tensões calculadas na iteração 0. Logo, as perdas no trecho 1, por exemplo, passam a ser:

$$\Delta P_1 = R_1 \left[\frac{P_1^2 + Q_1^2}{|V_1|^2} \right]$$

$$= 3 \left[\frac{1,76^2 + 1,32^2}{12,985^2} \right] = 0,0861 \text{ kW}$$

$$\Delta Q_1 = X_1 \left[\frac{P_1^2 + Q_1^2}{|V_1|^2} \right]$$

$$= 4 \left[\frac{1,76^2 + 1,32^2}{12,985^2} \right] = 0,1148 \text{ Mvar}$$

O método iterativo continua até que o critério de convergência seja satisfeito. Para o exemplo, o método converge em três iterações com uma tolerância de 10^{-3} , conforme a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resultados das iterações – Exemplo do Sistema de Distribuição (SOUZA, 2005).

Iterações	P	Q	A	B	V	ΔP	ΔQ
0	1,76	1,32	84,66	121	12,985	0	0
	0,80	0,6	78,101	41	12,488	0	0
	0,32	0,24	82,301	4	12,829	0	0
	-	-	-	-	-	0	0
1	1,7895	1,3550	84,4315	125,9606	12,966	0,0861	0,1148
	0,8000	0,6000	77,8568	41,0000	12,468	0,0257	0,0321
	0,3200	0,2400	82,0568	4,0000	12,810	0,0039	0,0029
	-	-	-	-	-	0,011954	0,14981
2	1,7896	1,3551	84,4307	125,9763	12,966	0,0899	0,1199
	0,8000	0,6000	77,8561	41,0000	12,468	0,0257	0,0322
	0,3200	0,2400	82,0561	4,0000	12,810	0,0039	0,0029
	-	-	-	-	-	0,11954	0,15497
3	1,7600	1,3551	84,4307	125,9763	12,966	0,0899	0,1199
	0,8000	0,6000	77,8561	41,0000	12,468	0,0257	0,0322
	0,3200	0,2400	82,0561	4,0000	12,810	0,0039	0,0029
	-	-	-	-	-	0,11956	0,15499

4.1.3 MSP Adaptado à Redes de Distribuição com Reguladores de Tensão

O Regulador de Tensão é um equipamento projetado para manter um nível de tensão pré-determinado na rede de distribuição de energia quando esta fica submetida a uma variação de tensão fora dos limites pré-estabelecidos. A localização do regulador de tensão é determinada a partir do perfil de tensão do sistema de modo que o mesmo opere dentro da faixa especificada. Normalmente funciona de forma automática conforme a demanda da rede, visando elevar ou rebaixar a tensão do nó, para corrigir o perfil de tensão. Esta compensação é realizada através da comutação de taps para que a tensão de saída do regulador não viole os limites pré-determinados. Esta faixa de regulação pode ser ajustada para os valores de $\pm 5\%$, $\pm 6,25\%$, $\pm 7,5\%$, $\pm 8,75\%$ e $\pm 10\%$, sendo a elevação ou a redução de tensão feita através de 32 degraus (16 para elevar e 16 para diminuir).

Modelo do Regulador de Tensão

Para as barras que contém reguladores, a modelagem proposta para a representação do regulador de tensão nos cálculos do fluxo de potência utiliza como variáveis de entrada: a tensão na barra fonte, a faixa de regulação, a quantidade de degraus disponíveis e a tensão de referência - tensão desejável na barra de carga (PEREIRA, 2009).

A equação (26) representa a modelagem utilizando o método “*Forward-Back-Sweep*” para o cálculo do fluxo de carga.

$$V_{sai} = V_{ent} \cdot \left(1 + \frac{tap \cdot fx}{100 \cdot nd} \right) \quad (26)$$

Onde:

$$tap = Int. \left[\frac{(V_{ref} - V_{ent}) \cdot 100}{V_{ent} \cdot \left(\frac{fx}{nd} \right)} \right] \quad (27)$$

Sendo:

V_{sai} tensão de saída na barra com Regulador de Tensão (pu)

V_{ent} tensão de entrada na barra com Regulador de Tensão (pu)

V_{ref} tensão de referência no Regulador de Tensão (pu)

fx faixa de regulação do Regulador de Tensão (%)

nd número de degraus do Regulador de Tensão

tap degrau de operação do Regulador de Tensão

A seguir, apresenta-se, de forma simplificada, o método utilizado:

Passo 1: Verifica-se, durante a atualização das tensões nas barras do fluxo de carga, se a mesma possui regulador de tensão instalado e em operação. Caso positivo, segue para o passo 2.

Passo 2: Calcula-se o ganho de tensão (gt) por degrau em função do número de degraus (nd) e da faixa de regulação (fx) corrigida e segue para o passo 3.

$$gt = \frac{fx}{nd'} (\%) \quad (28)$$

O número de degraus (nd') é considerado como a metade do número total de degraus nd do regulador.

$$nd' = \frac{nd}{2} \quad (29)$$

Passo 3: A tensão de referência do regulador (V_{ref}) é comparada com a tensão de entrada (V_{ent}) calculando assim a diferença de tensão (dif) e seguindo para o passo 4.

$$dif = \frac{(V_{ref} - V_{ent})}{V_{ent}} \cdot 100 (pu) \quad (30)$$

A diferença de tensão (dif) poderá ser positiva ou negativa, representando a operação do regulador de elevar ou rebaixar a tensão, respectivamente.

Passo 4: Adequando a tensão de entrada (V_{ent}) com a tensão de referência do regulador (V_{ref}) é calculada a quantidade de degraus (tap) necessários.

$$tap = \text{Inteiro} \left(\frac{dif}{gt} \right) \quad (31)$$

Caso o tap seja maior que a quantidade de degraus, considera-se o número máximo de degraus do regulador, e segue para o próximo passo 5.

Passo 5: Calcula-se a nova tensão de saída (V_{sai}) corrigida, em função do tap (degrau) utilizado, do ganho de tensão (gt) por degraus e da tensão de entrada (V_{ent}) do regulador.

$$V_{sai} = V_{ent} \cdot \left(1 + \frac{tap \cdot gt}{100} \right) \quad (32)$$

A nova tensão de saída (V_{sai}) é utilizada para estimar a nova tensão nas barras subsequentes ao regulador de tensão.

Para melhor entendimento do método apresentado, um algoritmo modificado do Método da Soma de Potência contendo reguladores de tensão foi implementado, de modo a demonstrar a eficiência do método empírico da soma de potência proposto para redes com reguladores de tensão, com o objetivo de melhorar o perfil de tensão e reduzir as perdas ativas em sistemas de distribuição radiais.

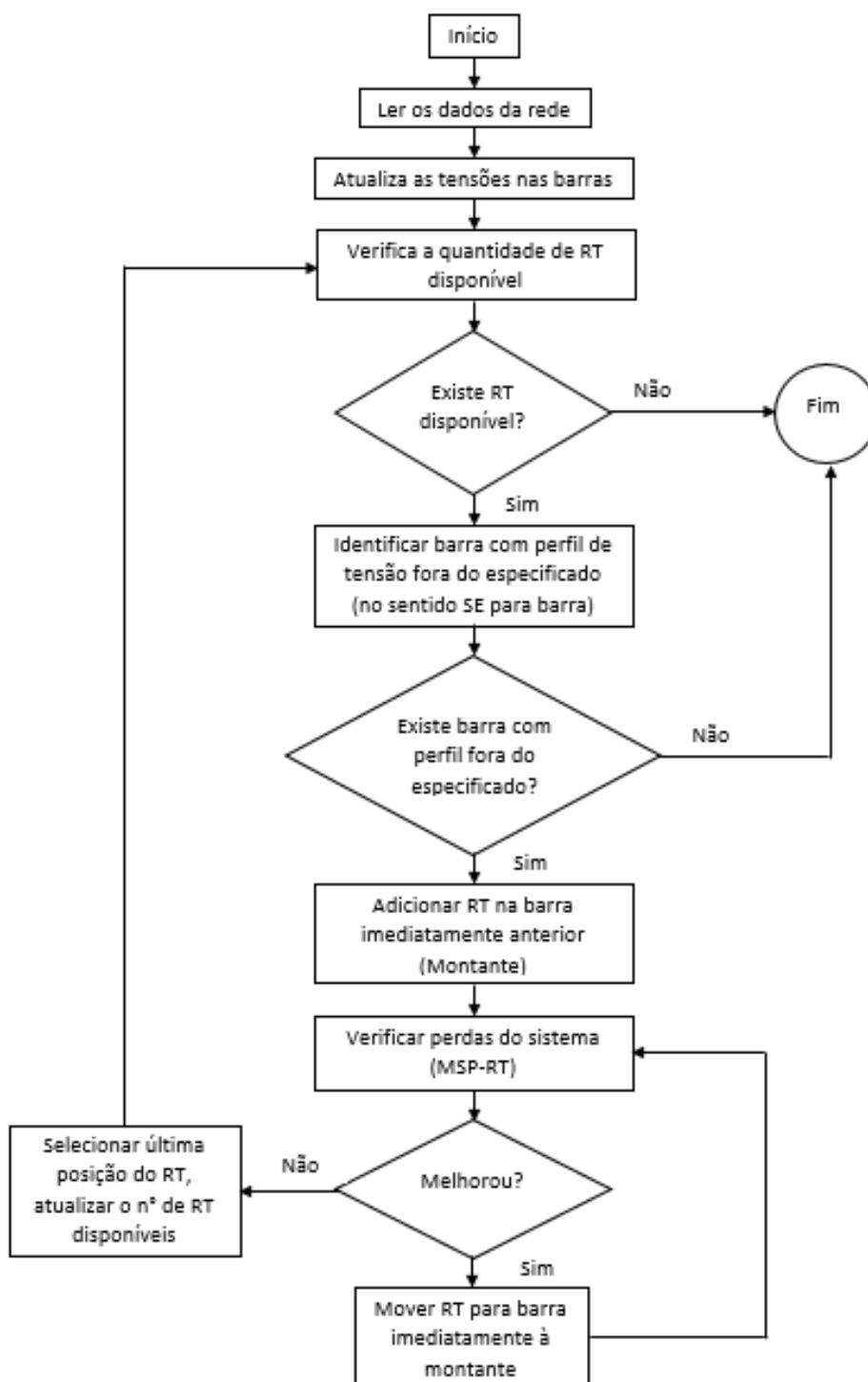


Figura 4.4 – Fluxograma – Método Prático de alocação de RT

Para a avaliação do algoritmo proposto, foi testado o sistema de distribuição radial com 33 barras de (BARAN; WU, 1989, apud HORA *et al*, 2018).

Para este exemplo, utilizou-se o valor de referência de 0,93 pu, como limite mínimo de tensão.

Tabela 4.3 – Pontos de entrega ou conexão em Tensão Nominal superior a 1kV e inferior a 69 kV (ANEEL, 2009 e 2014)

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

Sistema com 33 barras

Para o sistema contendo 33 barras, apresentado na Figura 4.5, utilizou-se como dados de entrada do sistema: uma tensão de 12,66 kV, número de barras ligadas a subestação igual a 1, número máximo de iterações igual a 5, e tolerância do método igual a 0,0001. Para o regulador de tensão, tem-se: número de degraus igual a 32, e faixa de regulação igual a 10.

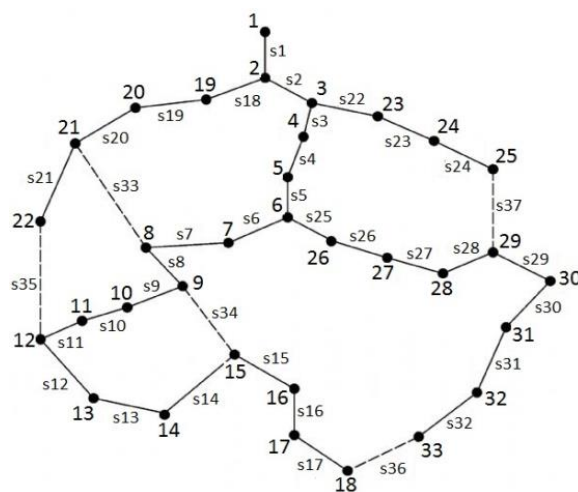


Figura 4.5 – Configuração inicial para sistema de 33 barras (PEREIRA, 2010)

A aplicação do algoritmo proposto, encontrou a seguinte solução: Alocar um regulador de tensão na barra 5 e aplicar o tap igual a 8, conforme Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Sistema de 33 barras com alocação de RT

Sistema com 33 barras	
	Regulador de Tensão
Localização	Barra 5
Tap	8
Perdas ativas kW (antes)	202,7
Perdas ativas kW (depois)	193,20

Verifica-se na Tabela 4.4, que a utilização de apenas um regulador de tensão foi suficiente para a diminuição expressiva das perdas ativas, o que tornou o sistema economicamente viável e com limites de tensão dentro do especificado, após a alocação do regulador de tensão e seleção dos taps, como mostra a Figura 4.6, com a comparação do perfil de tensão do sistema sem alocação de RT (antes), e com a alocação de RT (depois).

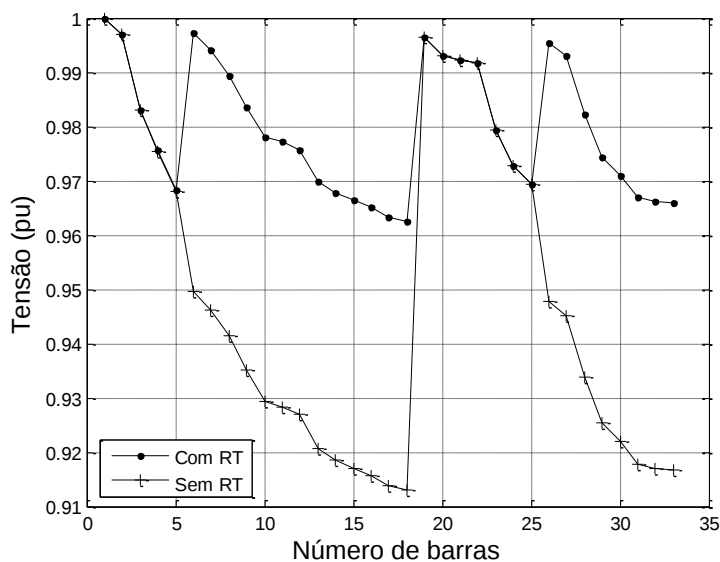


Figura 4.6 – Perfis de tensão para sistema de 33 barras tendo ou não a presença de regulador de tensão.

5 ALGORITMO DE FORMIGAS NA RECONFIGURAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO

5.1 INTRODUÇÃO

Grande parte das redes elétricas primárias de distribuição opera na configuração radial com a finalidade de expansão, facilidade de manobras operativas para transferência de carga entre alimentadores, de forma a atender tipos distintos de consumidores (industrial, comercial, residencial). Tais manobras são possíveis devido a existência de chaves de manobras localizadas em pontos estratégicos da rede.

A reconfiguração de redes de distribuição é o processo, sob condições operativas normais, de mudança de topologia através de manobras de chaves seccionadoras visando a otimização de um determinado índice de desempenho, reduzindo as perdas de potência ativa decorrentes da operação do sistema, melhorando assim o perfil de tensão ao longo do trecho e a confiabilidade do sistema.

Em razão dos estados das chaves seccionadoras manobráveis (aberto e fechado) requererem uma avaliação de um número muito grande de possibilidades, a reconfiguração para a busca por uma configuração ótima se torna uma tarefa árdua, não linear e de natureza combinatória, o que eleva a complexidade do problema.

Diversas metodologias tem sido implementadas, utilizando metaheurísticas, para lidar com o problema de reconfiguração, tais como: algoritmos genéticos (LIN, 2000), têmpera simulada (CHENG, 1994), métodos clássicos de otimização (WAGNER, 1991), algoritmos evolutivos (AMASIFEN, 2004), regras heurísticas (HSU, 1992) e colônia de formigas (SOUZA, 2010). Neste trabalho, utiliza-se o algoritmo de colônia de formigas para resolver o problema da reconfiguração de redes elétricas de distribuição.

5.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema de reconfiguração de redes de distribuição pode ser tratado como um problema de otimização não linear. Sua solução consiste em selecionar dentre

todas as configurações possíveis aquela em que as perdas totais de potência ativa sejam mínimas, satisfazendo a um conjunto de restrições.

Desta maneira, o problema pode ser formulado do seguinte modo:

$$F.O. = \text{Minimizar } \{\Delta P_{total}\} \quad (33)$$

Tendo como restrições:

- i. Limite de magnitude das tensões nodais:

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{máx};$$

- ii. Capacidade das ligações:

$$I_j \leq I_{máxj};$$

- iii. Configuração radial.

Onde: ΔP_{total} são as perdas de potência ativa total na rede; I_j e $I_{máxj}$ são respectivamente a magnitude da corrente e o limite máximo de corrente em cada ramo j ; V_i é a magnitude da tensão na barra i ; V_{min} e $V_{máx}$ são os limites mínimo e máximo de tensão respectivamente.

A restrição iii, é satisfeita quando são construídas apenas soluções de configurações radiais no deslocamento das formigas, o que torna desnecessária avaliação da configuração para confirmação. As restrições i e ii, são efetivas podendo ser tratadas das seguintes maneiras: (i) incluindo-as à função objetivo mediante funções de penalidade para onerar soluções que violem os limites impostos, tanto quanto maior for a violação; ou (ii) simplesmente descartando soluções que não satisfaçam os limites de capacidades nos trechos. O problema de otimização com restrições, expresso por (33), pode ser convertido em um problema de otimização irrestrita em que inclui-se direto na função objetivo a restrição de corrente máxima e tensão mínima e máxima nas ligações (SOUZA, 2010):

$$F.O. = \text{Minimizar}\{\Delta P_{total} + \sum_j \lambda_j (I_j - I_{jmax})^2 + \sum_i \mu_i [(V_i - V_{max})^2 + (V_i - V_{min})^2]\} \quad (34)$$

Sendo, F.O. o valor da função objetivo (lagrangeano), λ_j e μ_i fatores de pesos. A soma dos quadrados das restrições de tensão e correntes violadas são os termos de penalidades.

5.3 ESCOLHA PSEUDO-ALEATÓRIA DAS LIGAÇÕES NO PERCURSO DAS FORMIGAS – RECONFIGURAÇÃO DE REDES RADIAIS (ANT COLONY SYSTEM)

Para resolver problemas de reconfiguração através do algoritmo *Ant Colony System* (ACS), a rede de distribuição deve ser representada por um conjunto de pontos interligados, que representam as barras do sistema e as conexões por onde as formigas se movimentam, os ramos da rede que interligam as barras.

Através da regra de transição de estados, a formiga escolhe, pseudo-aleatoriamente, a próxima barra a ser visitada com base em seu próprio conhecimento (informação heurística da ligação) e no conhecimento coletivo (quantidade de feromônio depositado em cada uma dessas ligações) que é cumulativo, sendo atualizado sempre que uma nova configuração radial se completa.

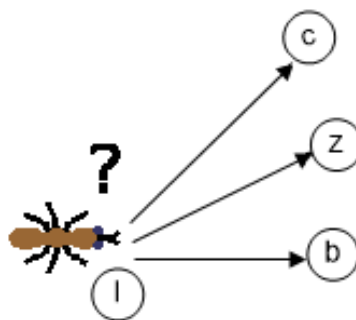


Figura 5.1 – Probabilidade de escolha das ligações

Durante a expedição, ou seja, construção de uma configuração radial, é considerado que os nós têm estados binários enquanto as ligações têm estados ternários: um nó pode estar *ligado* ou *desligado*, uma ligação pode ser *desativada*, *ativável* ou *ativada*.

Caso uma ligação esteja *ativada*, esta foi percorrida pela formiga, então seus dois nós devem estar necessariamente *ligados*. Se uma ligação estiver *desativada*, não foi percorrida pela formiga naquele instante, então seus dois nós devem estar necessariamente *desligados*. Se uma ligação está *ativável*, a formiga tem uma das opções à seguir naquele momento, então um de seus nós está *ligado* e o outro não. De outra forma, uma ligação está *ativada* quando tiver sido percorrida pela formiga. Do contrário, a ligação será considerada *desativada* se não há possibilidade de ser percorrida naquele instante (SOUZA, 2011).



Figura 5.2 – Estados dos nós e das ligações

A probabilidade de uma das ligações ativáveis ser escolhida por uma formiga (k), para sair da barra (i) em que se encontra para outra barra (j), tendo ψ como o conjunto de (i, j) ligações que podem ser visitadas pela formiga (k), é dada pela seguinte expressão:

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta}{\sum_{(i,l) \in \psi} \tau_{il}^\alpha \cdot \eta_{il}^\beta} & \text{Se } (i,l) \in \psi \\ 0, & \text{nos outros casos} \end{cases} \quad (35)$$

em que τ_{ij} é a quantidade de feromônio na ligação (i,j) , η_{ij} o inverso da resistência da ligação (i,j) , α o peso da carga de feromônio, β é o peso da resistência, (i,l) onde l é a barra ainda não visitada pela formiga e ψ é o conjunto das ligações ativáveis.

5.4 INFORMAÇÃO HEURÍSTICA NO PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO

Um agente (formiga) faz a escolha do próximo ponto a ser visitado por meio da informação heurística e da concentração de feromônio. A importância desses fatores pode ser incrementada por meio dos valores de α e β presentes na equação (35). Para o problema de reconfiguração, baseado no problema clássico do caixeiro viajante em que a informação heurística é calculada como o inverso da distância entre duas cidades, pode ser adaptada e implementada como o inverso da resistência (DORIGO et al, 2004). Neste trabalho, o cálculo da informação heurística, tomando como parâmetro a resistência de cada trecho do sistema, é dado por:

$$\eta_x = \frac{1}{R_x} \quad (36)$$

Onde R_x é a resistência do ramo x .

5.5 DISTRIBUIÇÃO DO FEROMÔNIO

Após as formigas completarem uma configuração factível, são calculadas as perdas na rede, e a carga de feromônio para todas as ligações ativadas da nova configuração e atualizada conforme ACS (Ant Colony System), variante da AS (Ant System), em que é realizada a atualização local de feromônio. Durante a construção de uma solução, a atualização local de feromônio é introduzida logo após a formiga ter percorrido um trecho do seguinte modo:

$$\tau_{i,j} = (1 - \varphi) \cdot \tau_{i,j} + \varphi \tau_0 \quad (37)$$

Onde, $\varphi \in (0,1]$ é o coeficiente de decaimento de feromônio, τ_0 é a quantidade inicial de feromônio e $\tau_{i,j}$ é a carga de feromônio na ligação.

A principal vantagem da atualização local de feromônio é diversificar o espaço de busca, uma vez que o decaimento de feromônio produz diferentes soluções, pelo fato das formigas escolherem outros caminhos. Isto torna o método com convergência mais rápida, e com melhor qualidade nas soluções.

Na regra da atualização global o incremento de feromônio é feito apenas em trechos com melhor solução, e após ser encontrada uma configuração factível, o feromônio é atualizado do seguinte modo:

$$\tau_{i,j} \leftarrow \begin{cases} (1 - \rho) \cdot \tau_{i,j} + \rho \Delta \tau_{i,j} & \text{Se } (i,j) \in N \\ \tau_{i,j} & \text{nos outros casos} \end{cases} \quad (38)$$

Onde N é o conjunto que contém as ligações da melhor configuração encontrada, $\Delta \tau_{i,j}$ é a carga incremental de feromônio na ligação e ρ é a taxa de evaporação, um número entre 0 e 1 (DORIGO et al, 2006).

5.6 RESOLUÇÃO DO PROBLEMA COM O ALGORITMO DE FORMIGAS

A construção de configurações radiais através da trajetória das formigas para a resolução do problema ocorre da seguinte forma:

- 1- Inicialmente todos os nós das fontes estão ligados, enquanto os nós de carga estão todos desligados, de modo a que nenhuma ligação esteja ativada.
- 2- As formigas se deslocam exclusivamente por ligações ativáveis através das equações de transição de estados.
- 3- Quando uma formiga chega ao nó desligado da ligação ativável que tenha percorrido, este nó torna-se ligado e a ligação ativada, surgindo outra formiga para ocupar o nó originalmente ligado deixado por ela.

- 4- O percurso de uma formiga se completa quando ela não puder mais seguir por ligações ativáveis.
- 5- O processo termina quando nenhuma formiga tiver mais mobilidade, ou seja, quando não houver nenhuma ligação ativável, encontrando-se assim uma configuração radial.
- 6- O método da soma de potência é implementado para calcular o fluxo de carga e as perdas, para avaliar a qualidade da configuração encontrada.

Ao término da expedição, sempre se obterá uma configuração radial. O número de formigas por expedição é variável. As formigas, enquanto puderem, vão surgindo de nós ligados e se movimentam por ligações ativáveis (SOUZA et al., 2010).

6 ALGORITMO COLÔNIA DE FORMIGAS NA ALOCAÇÃO DE REGULADORES DE TENSÃO

6.1 INTRODUÇÃO

As concessionárias de energia buscam operar o sistema de forma eficiente, controlando os níveis de tensão das linhas de distribuição e tendo em vista a minimização das perdas nos trechos, assim como também as reduções de custos agregados de modo a garantir a qualidade de fornecimento da energia e do serviço prestado. Para assegurar a confiabilidade dos níveis de tensão nos diversos pontos da rede de distribuição, é essencial a utilização de dispositivos, em pontos estratégicos, que permitam realizar um controle efetivo da tensão, melhorando assim o perfil de tensão nas barras do sistema. A instalação de reguladores de tensão, considerada uma prática usual pelas concessionárias, permitem a obtenção de uma faixa adequada de regulação de tensão da rede.

Para que essa tarefa de regulação de tensão seja realizada de maneira eficaz, busca-se determinar o melhor local de instalação, o dimensionamento e o ajuste dos equipamentos. Esta escolha adequada não é tarefa trivial, pois o problema é de análise combinatorial, e não-linear. Dessa forma, o desenvolvimento de ferramentas computacionais tornam-se importantes, dando suporte para a aplicação ótima dos recursos destinados à melhoria do sistema de distribuição.

Nesse capítulo da dissertação, será apresentada uma metodologia para alocação ótima de reguladores de tensão em redes de distribuição utilizando o Algoritmo Colônia de Formigas e através da modificação do Método da Soma de Potência, o ajuste ótimo dos taps.

6.2 REGULADORES DE TENSÃO

O Regulador de Tensão é um equipamento destinado a manter um determinado nível de tensão na rede de distribuição de energia quando esta fica submetida a uma variação de tensão fora dos limites especificados. O local onde o transformador da subestação já não é mais capaz de compensar a queda de tensão no alimentador é chamado de “*Ponto de Queda de Tensão*”. Para que a tensão não

fique fora dos limites estabelecidos pela legislação vigente, a partir deste ponto, é necessária a instalação de um regulador de tensão, que eleva os níveis de tensão novamente para os níveis adequados, conforme Figura 6.1 que ilustra a ação de um regulador de tensão instalado ao longo de um alimentador de distribuição (SHORT, 2003).

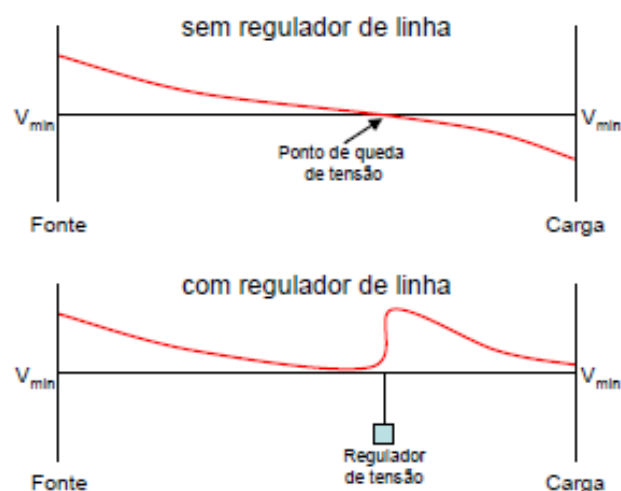


Figura 6.1 – Alimentador de distribuição – com e sem RT (RODRIGUES, 2007)

O regulador de tensão é semelhante a um transformador convencional de dois enrolamentos conectados eletricamente em um determinado ponto, com taps e circuito de controle responsável pela comutação, sempre que a tensão na saída do regulador violar os limites pré-determinados, essencialmente um autotransformador que pode operar como elevador ou rebaixador de tensão (PEREIRA, 2009). A Figura 6.2, apresenta a configuração de elevação de tensão, onde a bobina de excitação é incrementada através da polaridade da bobina série até que a tensão de saída esteja dentro da faixa ajustada de tensão, até o limite máximo do equipamento.

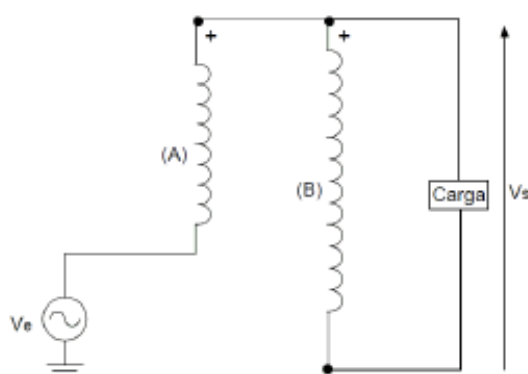


Figura 6.2 – Ligação – Elevação de tensão (MADRUGA, 2011)

A Figura 6.3, apresenta a configuração de redução de tensão, com a inversão da polaridade do enrolamento série, reduzindo a tensão de saída.

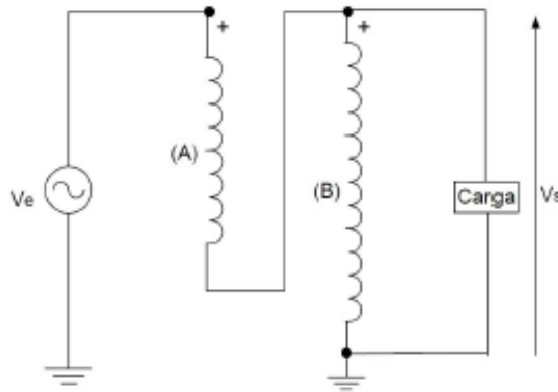


Figura 6.3 – Ligação – Redução de tensão (MADRUGA, 2011)

Onde:

V_e – Tensão de entrada

(A) – Bobina de TAPs ou enrolamento série

(B) – Bobina de excitação

V_s – Tensão de Saída

Existem basicamente três tipos de RTs: Autobooster, Line-Drop Compensation (LDC) e 32 Degraus (ALVES, 2005). Autobooster, que são equipamentos mais simples fabricados em unidades monofásicas, com 4 degraus e para variação de tensão de $\pm 6\%$ e 10% . Line Drop Compensation, que são equipamentos que permitem controlar a tensão em pontos remotos do alimentador, à jusante do ponto de instalação. E, o 32 Degraus, que são equipamentos que podem elevar ou reduzir a tensão do sistema. Existem dois tipos: A e B. O tipo A pode regular $+9,1\%$ e $11,1\%$. O tipo B pode regular $\pm 10\%$. Este regulador de tensão é o mais utilizado em sistemas de distribuição (FELICIO, 2006).

6.3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema de alocação de reguladores de tensão, assim como o problema de reconfiguração, pode ser tratado como um problema de otimização não linear e de natureza combinatória, favorecendo o uso de técnicas heurísticas para a solução do problema (SILVA, 2008).

A solução para o problema de alocação ótima de reguladores de tensão consiste em selecionar dentre todas as configurações possíveis aquela em que as perdas totais de potência ativa sejam mínimos, assim como das penalizações por violação de tensão e corrente, satisfazendo a um conjunto de restrições incorporadas à função objetivo expressa, em termos matemáticos, por uma equação de otimização irrestrita (32), conforme:

$$F.O. = \text{Minimizar} \{ \Delta P_{total} + \sum_j \lambda_j (I_j - I_{jmax})^2 + \sum_i \mu_i [(V_i - V_{max})^2 + (V_i - V_{min})^2] \} \quad (39)$$

Sendo, F.O. o valor da função objetivo (lagrangeano), (ΔP_{total}) a perda de potência ativa total, λ_j e μ_i fatores de pesos. A soma dos quadrados das restrições de tensão e correntes violadas são os termos de penalidades.

6.4 ALGORITMO COLÔNIA DE FORMIGAS NA ALOCAÇÃO DE REGULADORES DE TENSÃO

A aplicação do algoritmo colônia de formigas para a alocação de reguladores de tensão em redes de distribuição é um problema de natureza combinatória, no qual deseja-se determinar os locais dos dispositivos de regulação de tensão a fim de obter um melhor desempenho do sistema elétrico.

No algoritmo de Colônia de Formigas, o critério utilizado para a formiga selecionar uma barra para adicionar reguladores de tensão, em cada passo, é uma regra probabilística envolvendo feromônio e uma informação heurística.

A cada passo uma formiga k com $k_{j-1}^{(k)}$ regulador na barra $j - 1$, tem a probabilidade $P_j^{(k)}$ de selecionar a barra j .

$$P_j^{(k)} = \frac{(\tau_{j,r})^\alpha \cdot (\eta_{j,r})^\beta}{\sum_{z \in \psi} (\tau_{z,r})^\alpha \cdot (\eta_{z,r})^\beta} \quad (40)$$

Onde:

ψ é o conjunto das possíveis barras que podem receber o regulador k .

$\tau_{j,r}$ é a matriz de feromônio.

$\eta_{j,r}$ é a informação heurística associada ao nó j .
 α e β são fatores de escala.

Matriz Feromônio

O feromônio τ é uma matriz $(m \times n)$, cujas linhas da matriz referem-se às barras, e as colunas fazem referência ao acréscimo de regulador na determinada barra. A Figura 6.4 representa uma matriz feromônio para um sistema de j barras e r reguladores de tensão.

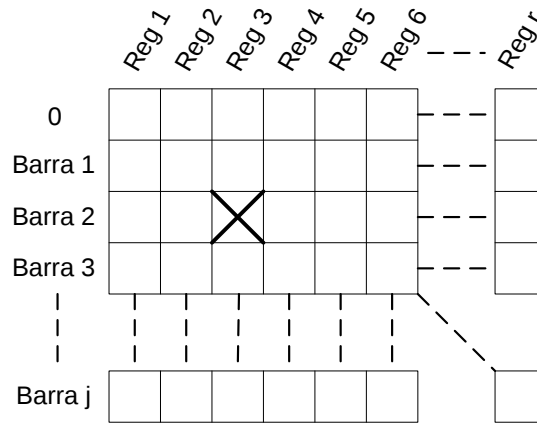


Figura 6.4 – Matriz Feromônio ($\tau_{j,r} = \tau_{2,3}$)

Informação Heurística

A informação heurística é denotada por $\eta_{j,r}$ e representa a atratividade de adicionar um regulador r no nó j . A informação heurística utilizada neste trabalho é o inverso da perda total de potência ativa depois da adição do regulador correspondente, e pode ser calculada da seguinte forma:

$$\eta_{j,r} = \frac{1}{Ploss_{total_{j,r}}} \quad (41)$$

$Ploss_{total_{j,r}}$ – é a perda total de potência ativa após adição do regulador r no nó j .

A informação heurística é previamente calculada e armazenada em uma matriz de mesma dimensão que a matriz de feromônio, sendo constante durante todo o processo de solução. Um dado elemento $a_{j,r}$ dessa matriz, indica o valor da informação heurística referente a adição de um regulador r no nó j .

Atualização Local (Evaporação de Feromônio):

A atualização local de feromônio é realizada logo após uma formiga ter percorrido um trecho durante a construção de uma solução. E, é realizada por todas as formigas, após cada passo na construção de uma solução. Assim que uma formiga realiza um deslocamento, a quantidade de feromônio no caminho deslocado é atualizada por:

$$\tau_{j,r} \leftarrow (1 - \varphi) \cdot \tau_{j,r} + \varphi \tau_0 \quad (42)$$

Onde:

φ é o coeficiente de decaimento de feromônio $\varphi \in (0,1]$

τ_0 é a quantidade inicial de feromônio

$\tau_{j,r}$ é a carga de feromônio referente a adição do regulador r na barra j .

O principal objetivo da atualização local de feromônio é diversificar a busca realizada pelas formigas durante iterações subsequentes. As formigas são encorajadas a escolher caminhos diferentes devido à diminuição da concentração de feromônio na ligação, aumentando o espaço de busca e produzido diferentes soluções (DORIGO et al., 2006). Com isso, o método apresenta uma melhor e/ou mais rápida convergência, encontrando soluções de melhor qualidade.

Atualização Global (Depósito de Feromônio):

A regra da atualização global de feromônio é um pouco diferente. As formigas percorrem o trecho reforçando as ligações que pertencem às

melhores soluções. Após encontrada uma configuração factível, o feromônio é atualizado por:

$$\tau_{j,r} = \begin{cases} (1 - \rho) \cdot \tau_{j,r} + \rho \Delta \tau_{j,r}, & \text{Se } (j,r) \in N \\ \tau_{j,r}, & \text{nos outros casos} \end{cases} \quad (43)$$

Onde:

N é o conjunto que contém as ligações da melhor configuração encontrada desde o início do algoritmo.

$\rho \in [0,1]$ é a taxa de evaporação do feromônio.

$\Delta \tau_{j,r}$ é a carga incremental de feromônio, expressa por:

$$\Delta \tau_{j,r} = \frac{1}{Ploss_{total_{j,r\text{ melhor}}}} \quad (44)$$

$Ploss_{total_{j,r\text{ melhor}}}$ é o valor da perda total de potência ativa pertencente à melhor solução.

Com a regra de atualização global, a capacidade de se encontrar a solução ótima pode ser reforçada, tornando a pesquisa mais direcionada.

Algoritmo ACS na alocação de reguladores de tensão:

Este algoritmo representa, de forma resumida, o deslocamento das formigas no espaço de busca, em que as mesmas escolhem o seu melhor caminho e definem a localização do regulador em cada ciclo.

A escolha das posições para o deslocamento de cada formiga são feitas através de cálculos de probabilidade e limitada ao número de reguladores a ser utilizado por cada uma delas em cada ciclo. A quantidade de reguladores é dado de entrada do algoritmo, portanto deve ser definido pelo usuário do programa.

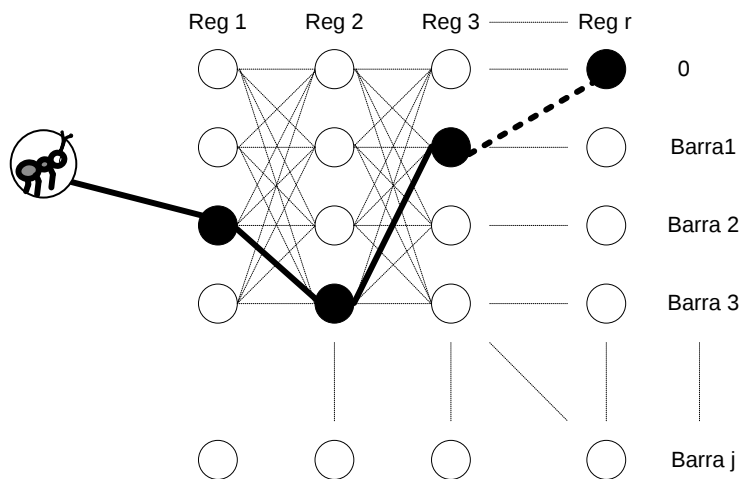


Figura 6.5 – Espaço de busca (Alocação de RT)

Algoritmo (descritivo):

Passo 1: Ler os dados do sistema, os parâmetros do algoritmo de formigas, dados do regulador de tensão;

Passo 2: Inicializar a matriz de feromônio, calcular a matriz de informação heurística;

Passo 3: Incrementar o contador de ciclos do algoritmo;

Passo 4: Selecionar uma das formigas para iniciar o movimento;

Passo 5: Para a formiga k escolhida, selecionar em quais barras serão adicionados os reguladores. O sorteio é realizado baseado nas probabilidades encontradas por meio da equação de transição de estados (40). Após cada movimento da formiga, atualizar o feromônio local através da equação de atualização local (42);

Passo 6: Assim que a formiga k tiver adicionado todos os reguladores, executar o MSP-RT modificado para o cálculo das perdas ativas totais e determinação dos taps correspondentes;

Passo 7: Verificar se todas as formigas já construíram suas soluções para o ciclo corrente. Caso sim, vai para o próximo passo, do contrário, voltar para o passo 4;

Passo 8: Atualizar o feromônio global através da equação de atualização global (43) sobre os caminhos percorridos pela formiga que

encontrou a melhor solução do ciclo corrente e selecionar como melhor solução;

Passo 9: Verificar se o número máximo de ciclos foi atingido. Caso negativo, voltar para o passo 3, do contrário, fim: apresentar a melhor solução global (posicionamento e taps dos reguladores de tensão; menor perda de potência ativa).

7 TESTES E RESULTADOS

7.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se a avaliação e testes do algoritmo colônia de formigas aplicado à reconfiguração e alocação de reguladores de tensão em redes de distribuição radiais. Para os testes, foram utilizados três sistemas de distribuição conhecidos da literatura: 16 barras (CINVANLAR, et al., 1988), 33 barras (BARAN; WU, 1989) e 70 barras (CHIANG; JEAN-JUMEAU, 1990b), e avaliados, através da análise dos perfis de tensão e comparativo dos resultados das perdas ativas dos sistemas nos métodos utilizados (reconfiguração, alocação de reguladores de tensão e alocação de reguladores de tensão após reconfiguração), o desempenho dos algoritmos implementados e a qualidade da solução encontrada para cada caso.

Os algoritmos foram implementados em Matlab® R2016a, computador Intel (R), Core (TM) i5, 1,60 GHz e 4,0 GB de memória RAM.

7.2 RECONFIGURAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO (CASO 1)

Para os testes realizados, foram atribuídos os parâmetros de entrada dos algoritmos com base em diversas simulações, utilizando a estratégia de tentativa e erro, até se obter valores que proporcionassem o melhor desempenho. Os parâmetros utilizados podem ser vistos na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Parâmetros de entrada utilizados nas simulações do algoritmo dos sistemas de distribuição

Parâmetros	Símbolos	16 barras	33 barras	70 barras
Peso do feromônio	α	1	1	1
Peso da inf. heurística	β	2	2	2
Taxa de evaporação	ρ	0,2	0,4	0,4
Taxa de decaimento	ϕ	0,1	0,1	0,1
Tolerância do MSP	ε	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}
Feromônio inicial	τ_0	1	1	1
Nº de expedições	exp	200	200	200
Limite max. de corrente	I_{max}	0,02	0,03	0,02
Limite min. de tensão	V_{min}	0,95	0,93	0,95
Limite max. de tensão	V_{max}	1,05	1,05	1,05

7.2.1 Sistema de 16 barras

O primeiro sistema utilizado para teste foi o de 16 barras (CINVANLAR, et al., 1988), de tensão nominal de 13,8 kV e 3 alimentadores (barras 1, 2 e 3), 3 laços de interconexão e 16 chaves seccionadoras, sendo originalmente 13 chaves fechadas e 3 chaves abertas, que podem ser visto na Figura 7.1. Os dados deste sistema estão apresentados no apêndice A.

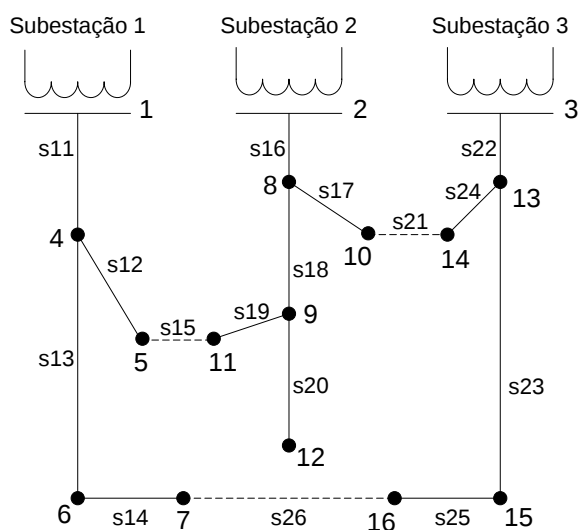


Figura 7.1 – Sistema de 16 barras – Configuração inicial (CINVANLAR, et al., 1988)

A configuração inicial apresenta perdas de potência ativa de 511,4 kW, contendo, inicialmente, as chaves 15-21-26 abertas. Os resultados encontrados para o sistema de 16 barras são apresentados na Tabela 7.2., e com o objetivo de verificar a qualidade da solução encontrada, são comparados com de outros autores.

Tabela 7.2 – Resultados obtidos para o sistema de 16 barras

Experimentos	Perdas (kW)	Red. (%)	Chaves abertas
Configuração Inicial	511,4	---	15-21-26
Algoritmo construído	466,1	8,86	17-19-26
Soluções encontradas na literatura			
(CHANG, 2008)	466,1	8,86	17-19-26
(CHENG; KUO, 1994)	466,1	8,86	17-19-26

Para o sistema de 16 barras, a configuração final das chaves e as perdas de potência ativa, estão de acordo com os valores encontrados na literatura, quando comparados com os das referências: (CHANG, 2008) e (CHENG; KUO 1994), em que no primeiro resolve o problema utilizando a metaheurística Colônia de Formigas e o segundo por *Simulated Annealing*.

Para as simulações com o sistema de 16 barras, utilizou-se um limite mínimo para tensão de 0,95 pu e um limite máximo de 1,05 pu. Na Figura 7.2 verifica-se o perfil de tensão do sistema antes e depois da reconfiguração.

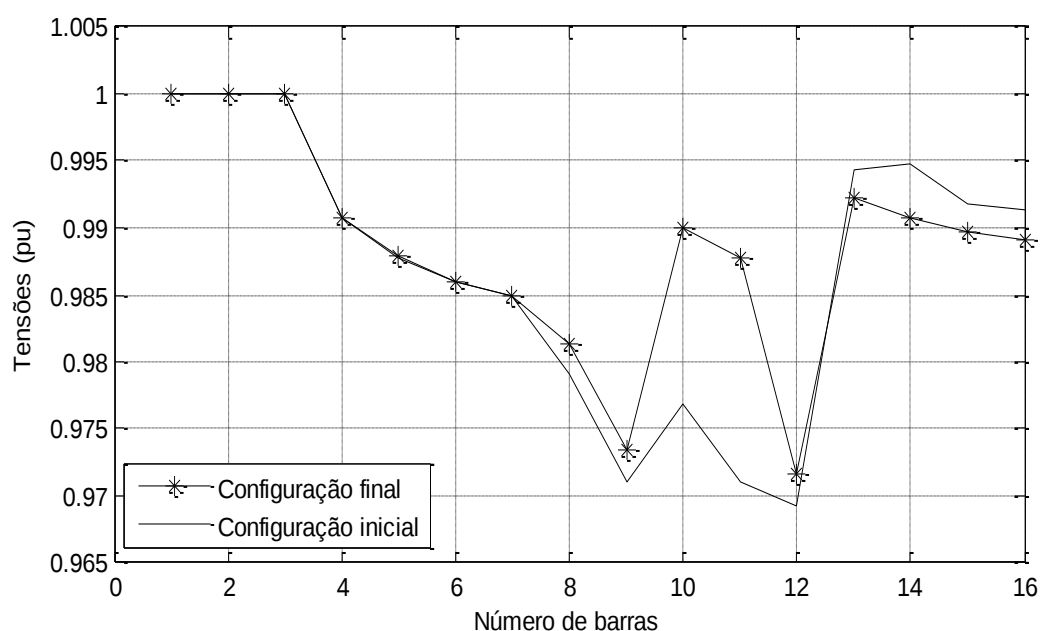


Figura 7.2 – Sistema de 16 barras – Perfis de tensão (Inicial e final)

A configuração final proporciona uma melhoria na qualidade da tensão do sistema, quando comparado com a topologia inicial, com menor perda de potência ativa possível nos alimentadores. Assim, para configuração inicial, a barra 12 apresenta a menor tensão com valor de 0,969 pu. Enquanto que a topologia final, a mesma barra 12 se encontra com menor tensão com valor de 0,972 pu.

7.2.2 Sistema de 33 barras

O segundo sistema utilizado para teste foi o de 33 barras (BARAN; WU, 1989) de tensão nominal de 12,66 kV. Esse sistema possui 1 alimentador (barra 1 - subestação), 5 laços de interconexão e 37 chaves seccionadoras, sendo

originalmente 32 chaves fechadas e 5 chaves abertas (33-34-35-36-37), como pode ser visto na Figura 7.3. Os dados desse sistema estão apresentados no Apêndice A.

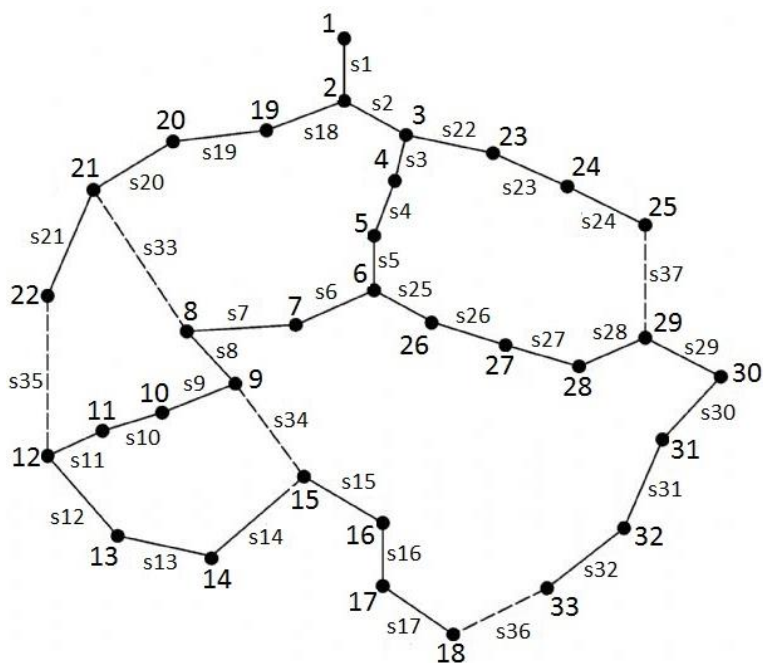


Figura 7.3 – Sistema de 33 barras – Configuração inicial (PEREIRA, 2010)

A configuração inicial do sistema apresenta perdas ativas totais de 202,68 kW. Os resultados encontrados para o sistema de 33 barras são apresentados na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Resultados obtidos para o sistema de 33 barras

Experimentos	Perdas (kW)	Red. (%)	Chaves abertas
Configuração Inicial	202,7	---	33-34-35-36-37
Algoritmo construído	139,5	31,2	7-9-14-32-37
Soluções encontradas na literatura			
(CHENG et al., 1994)	139,7	31,1	7-9-14-32-37
(ZVIETCOVICH, 2006)	139,5	31,2	7-9-14-32-37

Para o sistema de 33 barras, a configuração final e as perdas de potência ativa estão em concordância com os resultados apresentados na literatura, quando comparados com os resultados dos trabalhos de duas referências: (CHENG et al., 1994) e (ZVIETCOVICH, 2006), onde o primeiro resolve o problema através da

heurística “*Simulated Annealing*” e o segundo utiliza Busca Tabu em Vizinhança Variável.

Para as simulações com o sistema de 33 barras, adotou-se um limite mínimo para tensão de 0,93 pu e um limite máximo de 1,05 pu. Na Figura 7.4 verifica-se o perfil de tensão do sistema antes e depois da reconfiguração.

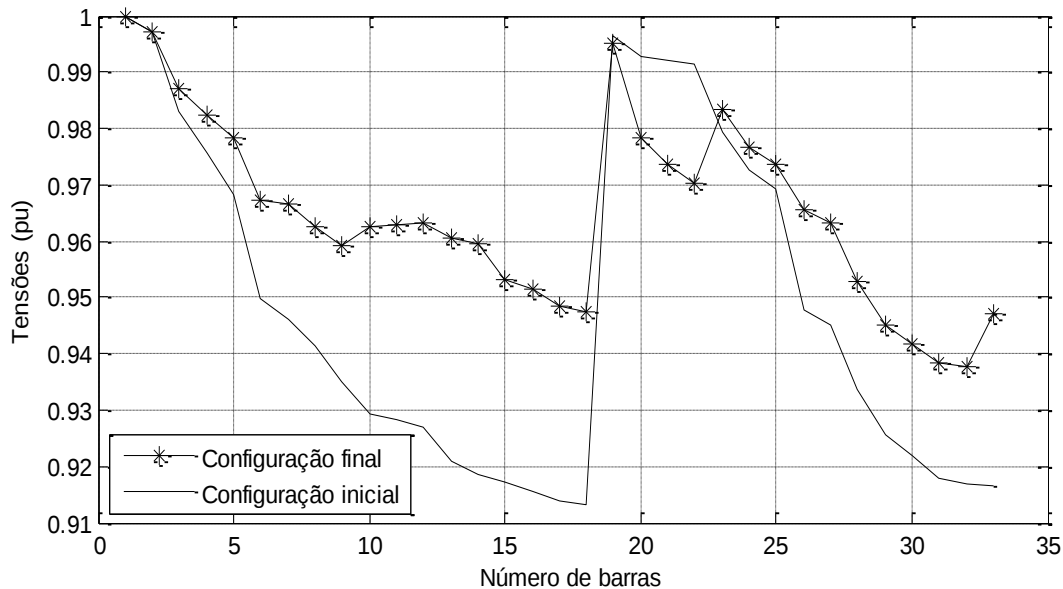


Figura 7.4 – Sistema de 33 barras – Perfis de tensão (Inicial e final)

A configuração final proporciona uma melhor distribuição de tensão, e melhora na qualidade da tensão do sistema, quando comparado com a configuração inicial, com menor perda de potência ativa possível nos alimentadores. Assim, para configuração inicial, a barra 18 apresenta a menor tensão com valor de 0,913 pu. Enquanto que na configuração final, a barra 32 se encontra com menor tensão com valor de 0,938 pu.

7.2.3 Sistema de 70 barras

O terceiro sistema utilizado para teste foi o encontrado em (CHIANG; JEAN-JUMEAU, 1990b), de tensão nominal de 12,66 kV, 70 barras, um alimentador (barra 1 - subestação), 74 chaves seccionadoras, tendo inicialmente 69 chaves fechadas e 5 chaves abertas (chaves 70-71-72-73-74), como pode ser visto na Figura 7.5. Os dados desse sistema estão apresentados no Apêndice A.

Para as simulações deste sistema, utilizou-se um limite mínimo de tensão mais severo, 0,98 pu, devido o sistema possuir na configuração inicial um bom perfil de tensão, e um limite máximo de 1,05 pu. Na Figura 7.6 verifica-se o perfil de tensão do sistema antes e depois da reconfiguração.

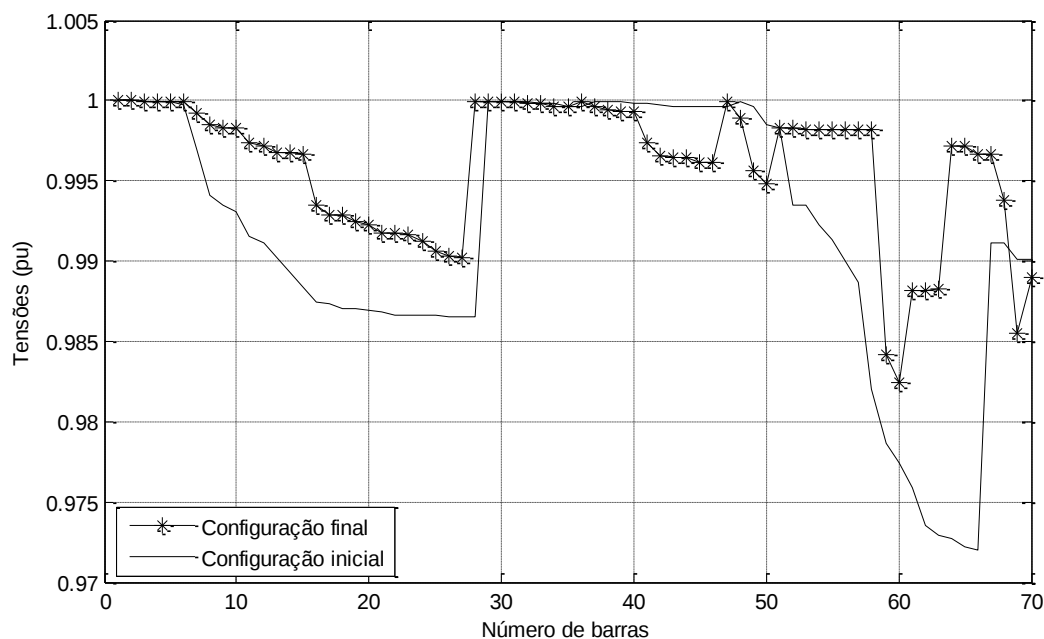


Figura 7.6 – Sistema de 70 barras – Perfis de tensão (Inicial e final)

A configuração final proporciona uma melhor distribuição de tensão, e melhora na qualidade da tensão do sistema, quando comparado com a configuração inicial, com menor perda de potência ativa possível nos alimentadores. Assim, para configuração inicial, a barra 66 apresenta a menor tensão com valor de 0,972 pu. Enquanto que na configuração final, a barra 60 se encontra com menor tensão com valor de 0,983 pu.

7.3 ALOCAÇÃO DE REGULADORES DE TENSÃO (CASO 2):

Neste estudo de caso, o algoritmo implementado para solucionar o problema da alocação de reguladores de tensão é testado para os sistemas de 16 barras (CINVANLAR, et al., 1988), 33 barras (BARAN; WU, 1989) e 70 barras (CHIANG; JEAN-JUMEAU, 1990b). O algoritmo implementado é baseado no Ant Colony System e utiliza o MSP adaptado à rede de distribuição com reguladores de tensão para o ajuste do tap.

7.3.1 Sistema de 16 barras

O algoritmo foi aplicado para o sistema de 16 barras com a configuração inicial de (CINVANLAR, et al., 1988). Como mencionado, o sistema apresenta perdas de potência ativa iniciais de 511,4 kW. Os resultados encontrados para o sistema com a alocação de reguladores de tensão são apresentados na Tabela 7.5.

Tabela 7.5 – Resultados obtidos para o sistema de 16 barras

Experimentos	Perdas (kW)	Red. (%)	Alocação/Tap
Configuração Inicial	511,4	---	---
Algoritmo construído (1 RT)	458,3	10,4	Barra 8 / Tap 12
Algoritmo construído (2 RT)	448,8	12,3	Barra 4 / Tap 10 Barra 8 / Tap 12

Com a melhoria da tensão do sistema após a alocação ótima de somente um regulador de tensão, verifica-se uma expressiva melhoria nas perdas de potência ativa do sistema.

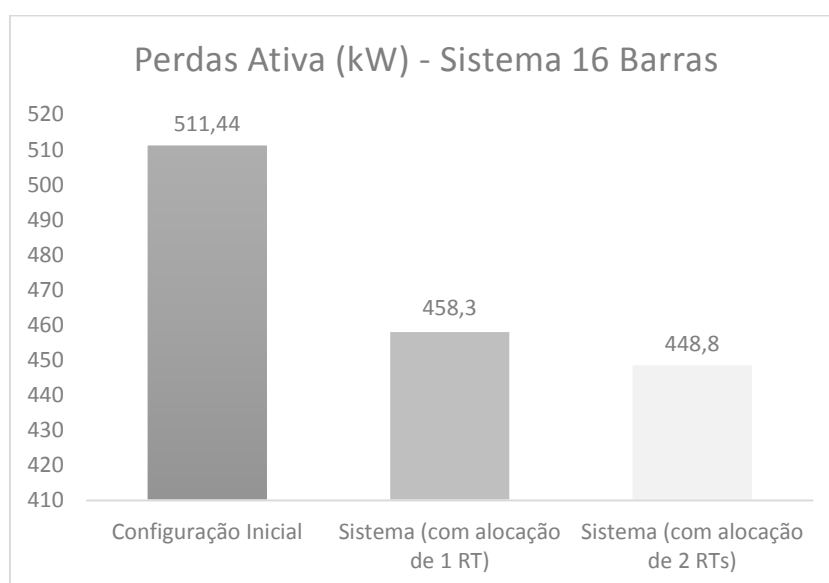


Figura 7.7 – Sistema de 16 barras – Perdas ativas (1 RT e 2 RTs)

Para as simulações deste sistema, utilizou-se um limite mínimo para tensão de 0,95 pu e um limite máximo de 1,05 pu. Nas Figuras 7.8 e 7.9 verificam-se os perfis de tensão do sistema antes e depois da alocação dos reguladores de tensão.

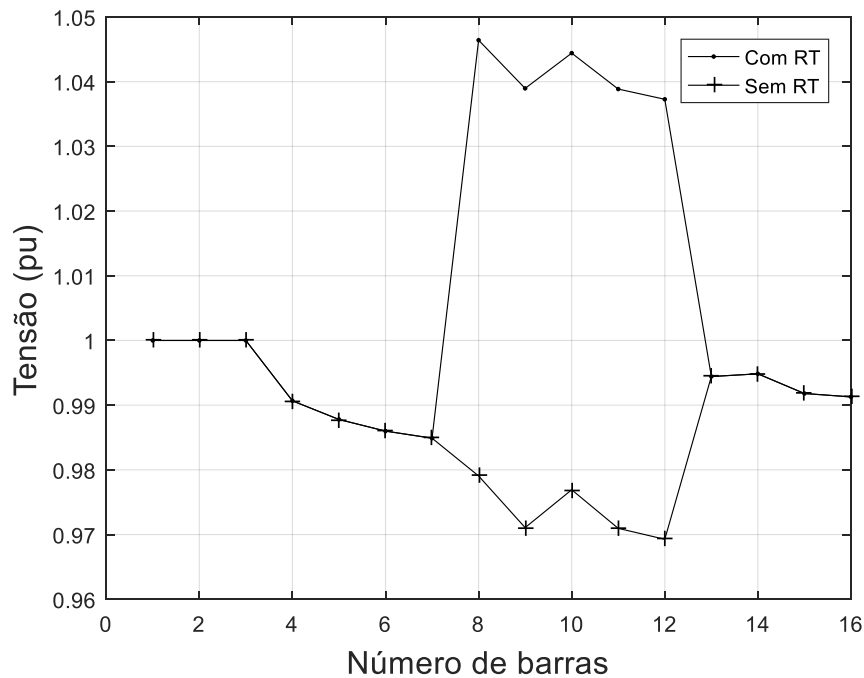


Figura 7.8 – Sistema de 16 barras (1 RT) – Perfil de Tensão (inicial e final)

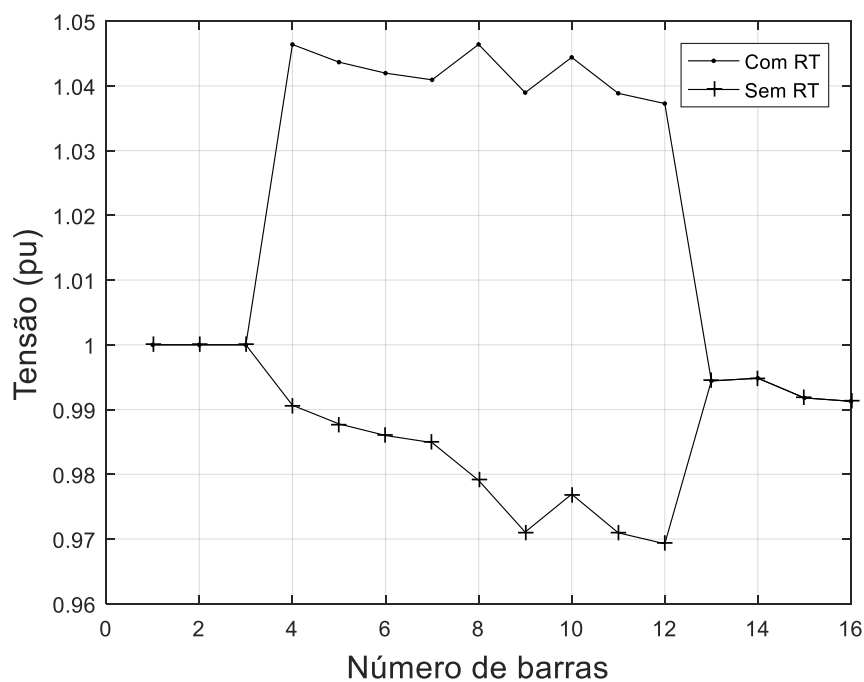


Figura 7.9 – Sistema de 16 barras (2 RTs) – Perfil de Tensão (inicial e final)

Verifica-se, na configuração final, melhor distribuição de tensão, dentro dos limites especificados, melhorando a qualidade de tensão do sistema.

7.3.2 Sistema de 33 barras

O algoritmo foi aplicado para o sistema de 33 barras com a configuração inicial encontrado em (BARAN; WU, 1989). Como mencionado, o sistema apresenta perdas de potência ativa iniciais de 202,68 kW. Os resultados encontrados para o sistema com a alocação de reguladores de tensão são apresentados na Tabela 7.6.

Tabela 7.6 – Resultados obtidos para o sistema de 33 barras

Experimentos	Perdas (kW)	Red. (%)	Alocação/Tap
Configuração Inicial	202,68	---	---
Algoritmo construído (1 RT)	176,5	12,9	Barra 3 / Tap 11
Algoritmo construído (2 RT)	171,3	15,5	Barra 3 / Tap 11 Barra 6 / Tap 5

Verifica-se uma melhora significativa nas perdas de potência ativa do sistema, após regular a tensão do sistema com a alocação de apenas um regulador de tensão.

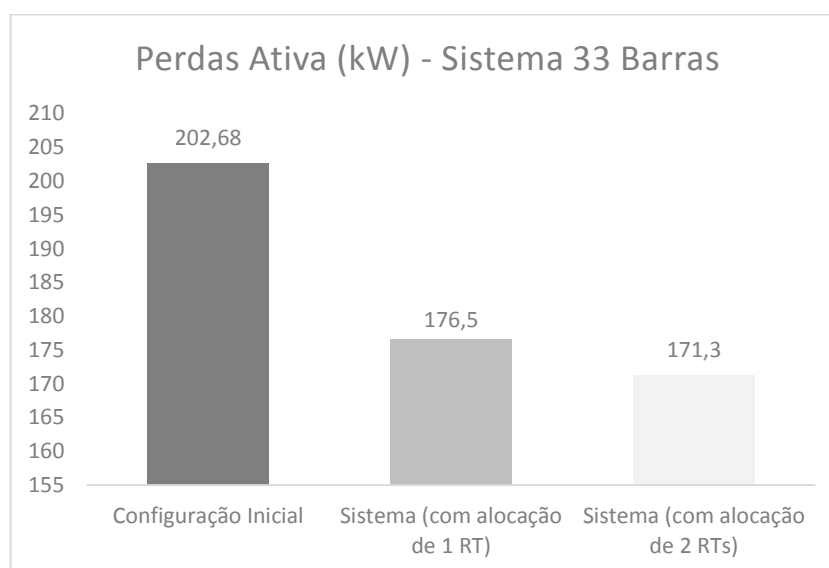


Figura 7.10 – Sistema de 33 barras – Perdas ativas (1 RT e 2 RTs)

Para as simulações deste sistema, utilizou-se um limite mínimo para tensão de 0,95 pu e um limite máximo de 1,05 pu. Nas Figuras 7.11 e 7.12 verificam-se o perfis de tensão do sistema antes e depois da alocação do regulador de tensão.

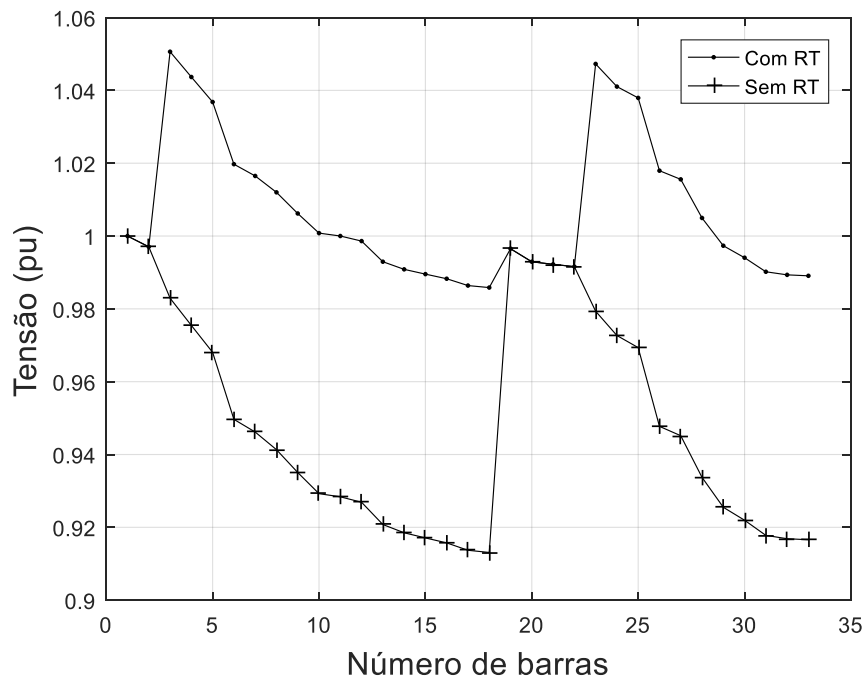


Figura 7.11 – Sistema de 33 barras (1 RT) – Perfil de Tensão (inicial e final)

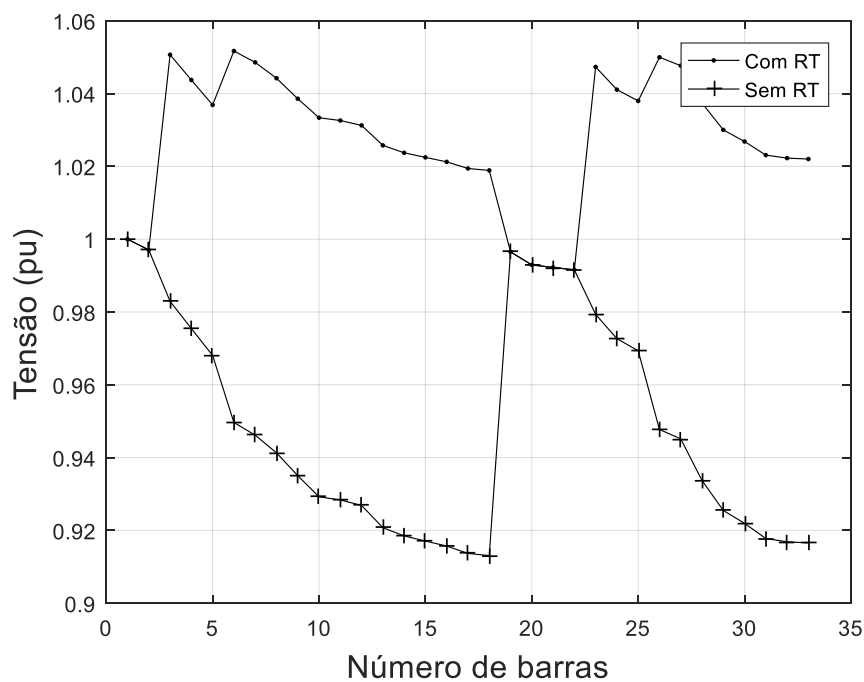


Figura 7.12 – Sistema de 33 barras (2 RTs) – Perfil de Tensão (inicial e final)

A configuração inicial apresenta um afundamento de tensão próximo à 0,92 pu, e com a alocação ótima de um regulador de tensão foi suficiente para melhoria da distribuição de tensão do sistema próximo à 1 pu e dentro dos limites especificados.

7.3.3 Sistema de 70 barras

O algoritmo foi aplicado para o sistema de 70 barras com a configuração inicial encontrado em (CHIANG; JEAN-JUMEAU, 1990b). Como mencionado, o sistema apresenta perdas de potência ativa iniciais de 20,91 kW. Os resultados encontrados para o sistema com a alocação de reguladores de tensão são apresentados na Tabela 7.7.

Tabela 7.7 – Resultados obtidos para o sistema de 70 barras

Experimentos	Perdas (kW)	Red. (%)	Alocação/Tap
Configuração Inicial	20,91	---	---
Algoritmo construído (1 RT)	18,7	10,6	Barra 7 / Tap 9
Algoritmo construído (2 RT)	18,4	12,0	Barra 7 / Tap 9 Barra 58 / Tap 2

Verifica-se que, mesmo com a configuração inicial deste sistema apresentando um perfil de tensão dentro dos limites mínimos especificados, com a alocação ótima de um regulador de tensão, houve melhoria das perdas de potência ativa.

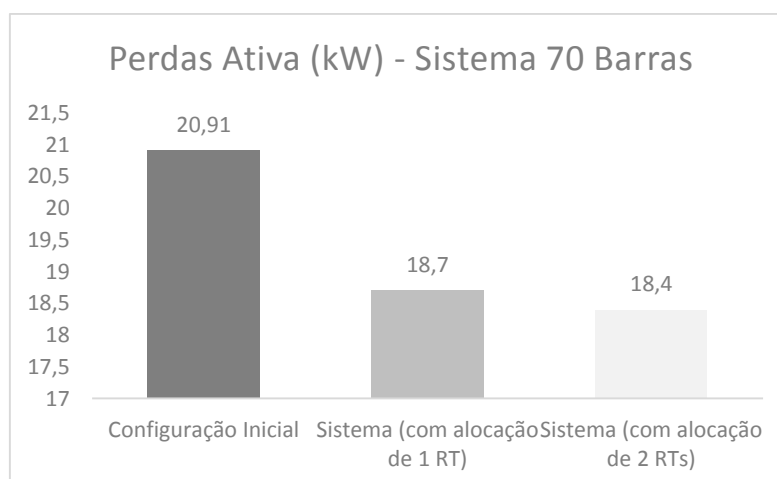


Figura 7.13 – Sistema de 70 barras – Perdas ativas (1 RT e 2 RTs)

No sistema de 70 barras, como o mesmo possui um perfil de tensão consideravelmente bom, foi estipulado um limite mais severo de 0,98 pu como limite mínimo de tensão e um limite máximo de 1,05 pu.

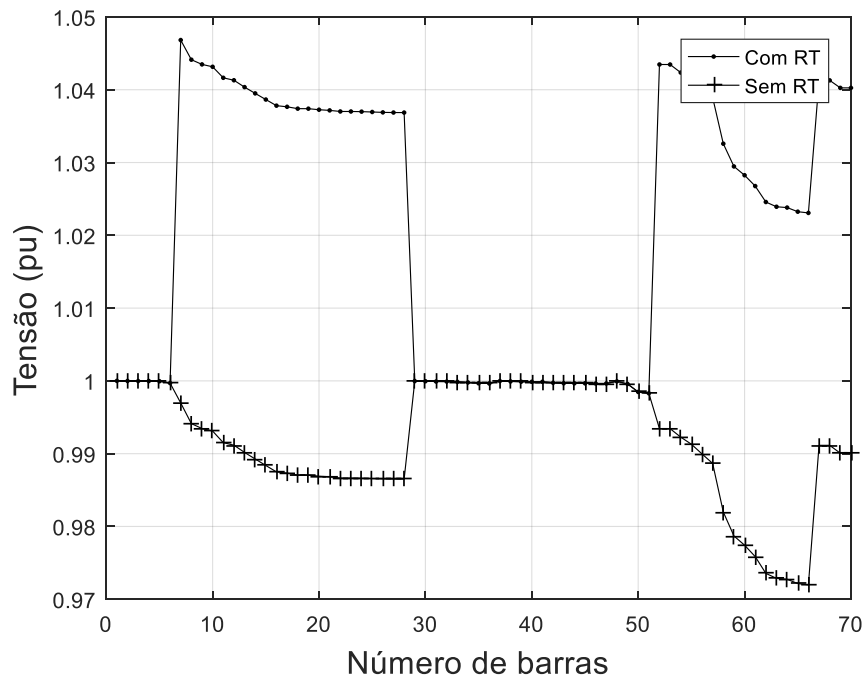


Figura 7.14 – Sistema de 70 barras (1 RT) – Perfil de Tensão (inicial e final)

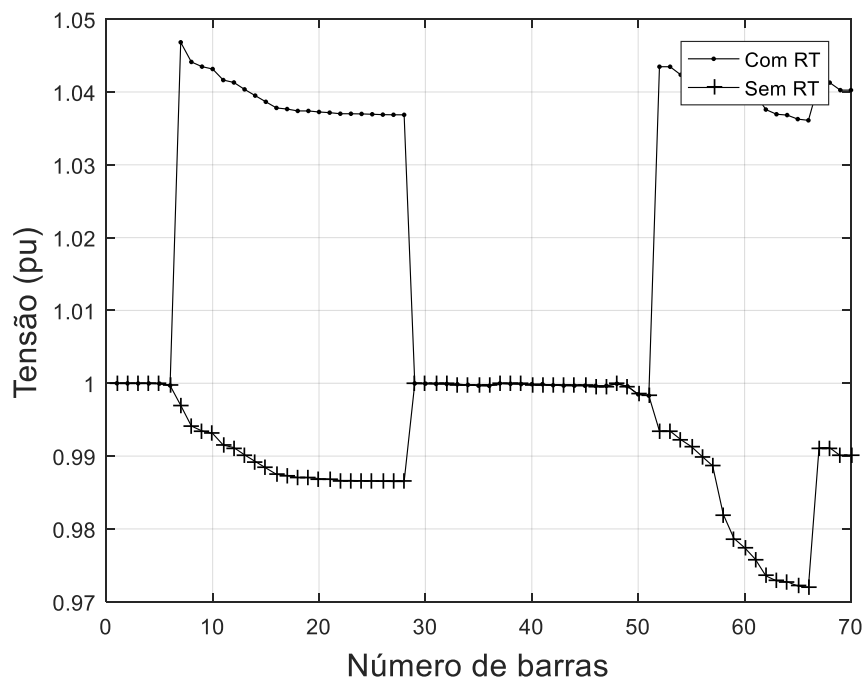


Figura 7.15 – Sistema de 33 barras (2 RTs) – Perfil de Tensão (inicial e final)

Verifica-se na configuração final, a regulação e melhoria na qualidade de tensão, mesmo com o sistema apresentando um bom perfil de tensão na configuração inicial.

7.4 ALOCAÇÃO DE REGULADORES DE TENSÃO APÓS RECONFIGURAÇÃO (CASO 3):

Para o método em questão, o algoritmo implementado para solucionar o problema da alocação de reguladores de tensão é testado para os sistemas reconfigurados de 16 barras (CINVANLAR, et al., 1988), 33 barras (BARAN; WU, 1989) e 70 barras (CHIANG; JEAN-JUMEAU, 1990b).

7.4.1 Sistema de 16 barras

O algoritmo foi aplicado para o sistema reconfigurado de 16 barras com a configuração inicial encontrada em (CINVANLAR, et al., 1988), com perdas de potência ativa iniciais de 511,4 kW. Os resultados encontrados para o sistema com a alocação de reguladores de tensão são apresentados na Tabela 7.8.

Tabela 7.8 – Resultados obtidos para o sistema de 16 barras

Experimentos	Perdas (kW)	Red. (%)	Alocação/Tap
Configuração Inicial	511,4	---	---
Algoritmo construído (1 RT)	425,9	16,7	Barra 8 / Tap 11
Algoritmo construído (2 RT)	415,4	18,8	Barra 4 / Tap 10 Barra 8 / Tap 11

Verifica-se que com a reconfiguração, conseguiu-se encontrar caminhos menos críticos e somado ao ajuste de tensão devido à alocação ótima do regulador de tensão, reduziu-se significativamente as perdas de potência ativa do sistema.

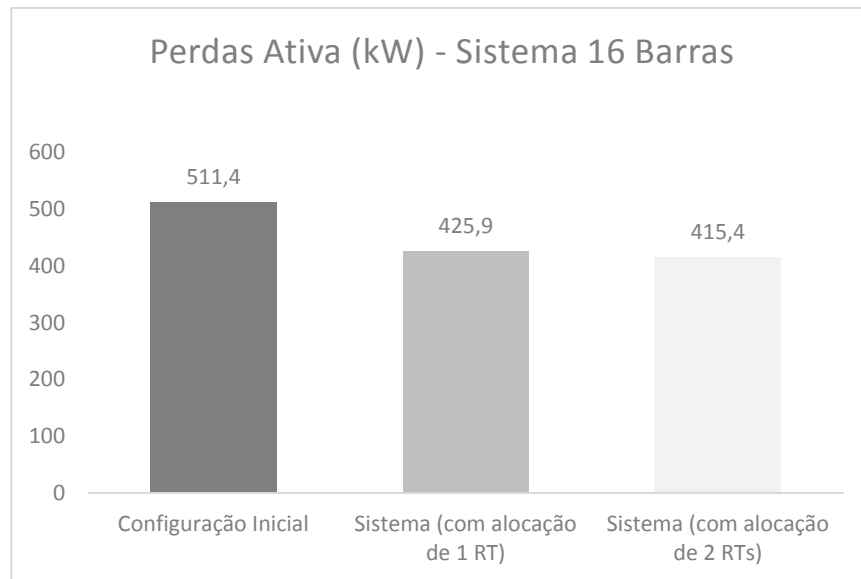


Figura 7.16 – Sistema de 16 barras – Perdas ativas (1 RT e 2 RTs)

Para as simulações com o sistema de 16 barras, utilizou-se um limite mínimo para tensão de 0,98 pu e um limite máximo de 1,05 pu. Nas Figuras 7.17 e 7.18 verificam-se o perfis de tensão do sistema antes e depois da alocação de reguladores de tensão.

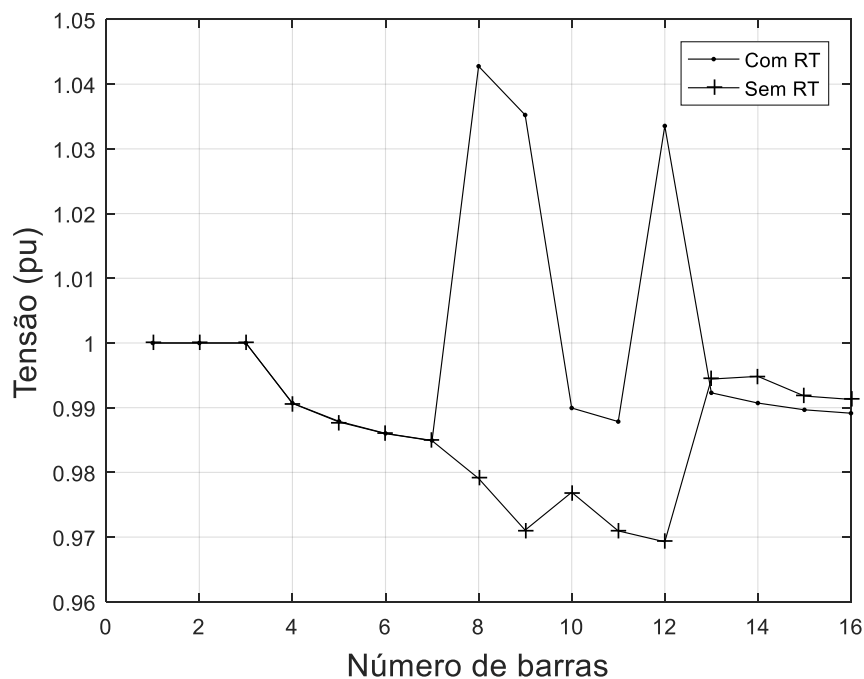


Figura 7.17 – Sistema de 16 barras (1 RT) – Perfil de Tensão (inicial e final)

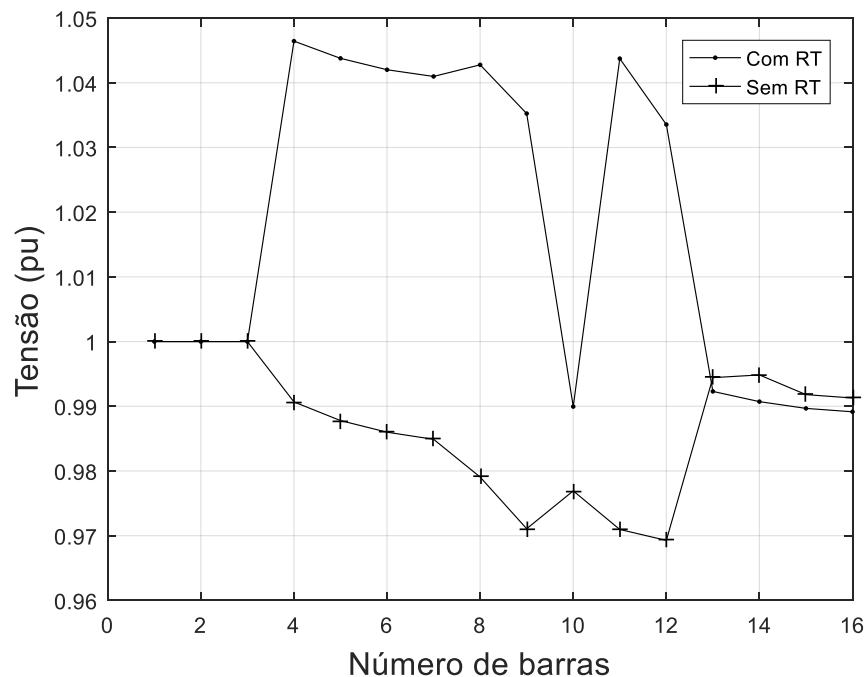


Figura 7.18 – Sistema de 16 barras (2 RTs) – Perfil de Tensão (inicial e final)

A configuração final, após alocação dos reguladores de tensão, proporciona uma melhoria na qualidade da tensão do sistema, quando comparado com a topologia inicial, com menor perda de potência ativa possível. Observa-se que, para configuração inicial, a barra 12 apresenta a menor tensão com valor de 0,969 pu. Enquanto que a topologia final, a barra 10 com menor tensão, se encontra com o valor de tensão de 0,99 pu.

7.4.2 Sistema de 33 barras

O algoritmo foi aplicado para o sistema reconfigurado de 33 barras com a configuração inicial de (BARAN; WU, 1989), com perdas de potência ativa iniciais de 202,7 kW. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 7.9.

Tabela 7.9 – Resultados obtidos para o sistema de 33 barras

Experimentos	Perdas (kW)	Red. (%)	Alocação/Tap
Configuração Inicial	202,68	---	---
Algoritmo construído (1 RT)	125,5	38,1	Barra 2 / Tap 8
Algoritmo construído (2 RT)	123,2	39,2	Barra 2 / Tap 8 Barra 6 / Tap 5

Verifica-se na Figura 7.19, que a alocação ótima de reguladores de tensão neste sistema reconfigurado de 33 barras, apresenta uma expressiva diminuição das perdas de potência ativa.

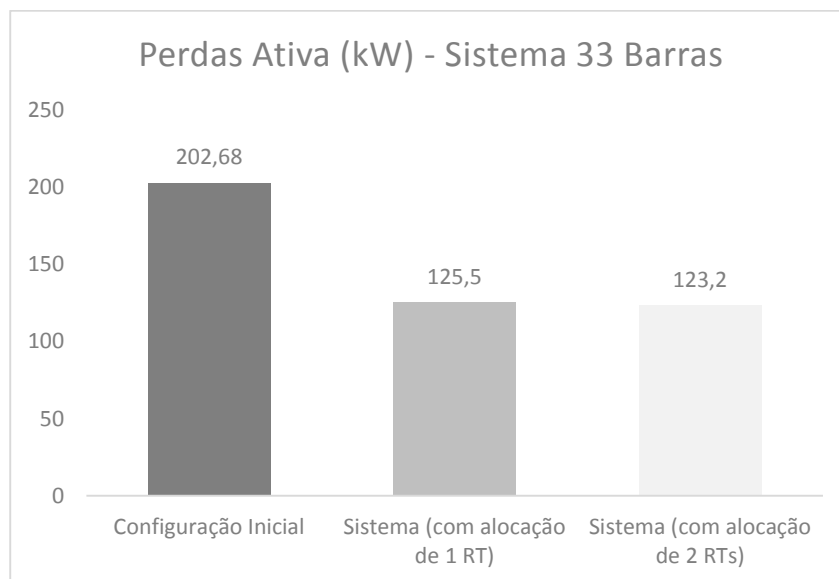


Figura 7.19 – Sistema de 33 barras – Perdas ativas (1 RT e 2 RTs)

Para as simulações deste sistema, utilizou-se um limite mínimo para tensão de 0,95 pu e um limite máximo de 1,05 pu. Nas Figuras 7.20 e 7.21 verificam-se os perfis de tensão do sistema antes e depois da alocação dos reguladores de tensão.

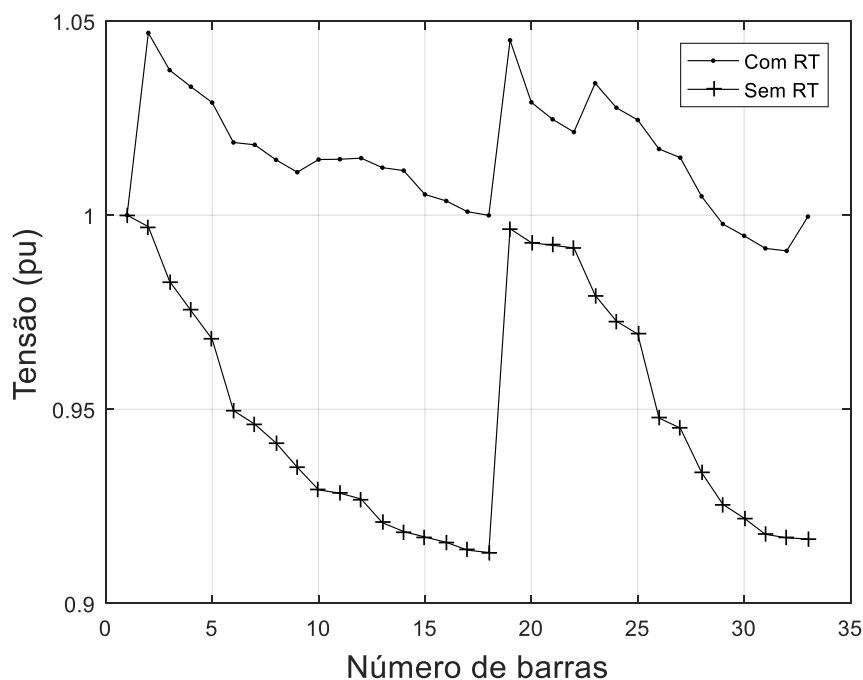


Figura 7.20 – Sistema de 33 barras (1 RT) – Perfil de Tensão (inicial e final)

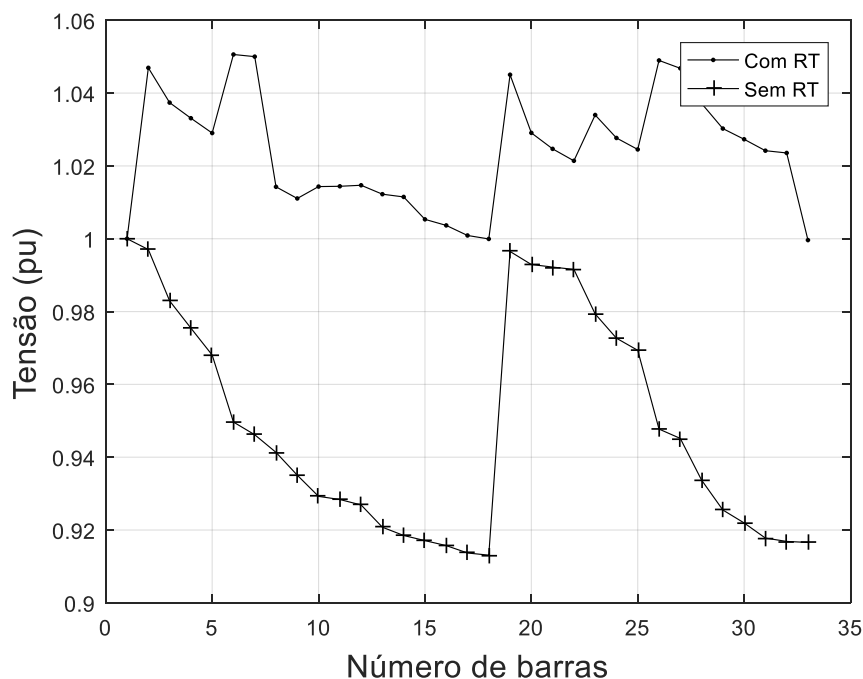


Figura 7.21 – Sistema de 33 barras (2 RTs) – Perfil de Tensão (inicial e final)

A configuração final proporciona uma melhor distribuição de tensão, e melhoria na qualidade da tensão do sistema, quando comparado com a configuração inicial, com tensões maiores ou iguais à 1 pu e com limites de tensão dentro do especificado.

7.4.3 Sistema de 70 barras

O algoritmo foi aplicado para o sistema reconfigurado de 70 barras com a configuração inicial de (CHIANG; JEAN-JUMEAU, 1990b). perdas de potência ativa iniciais de 20,91 kW. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 7.10.

Tabela 7.10 – Resultados obtidos para o sistema de 70 barras

Experimentos	Perdas (kW)	Red. (%)	Alocação/Tap
Configuração Inicial	20,91	---	---
Algoritmo construído (1 RT)	8,6	58,9	Barra 2 / Tap 7
Algoritmo construído (2 RT)	8,4	59,8	Barra 2 / Tap 7 Barra 69 / Tap 2

Verifica-se na Figura 7.22, que a alocação ótima de apenas um regulador de tensão neste sistema reconfigurado de 70 barras, foi suficiente para uma diminuição significativa das perdas de potência ativa.

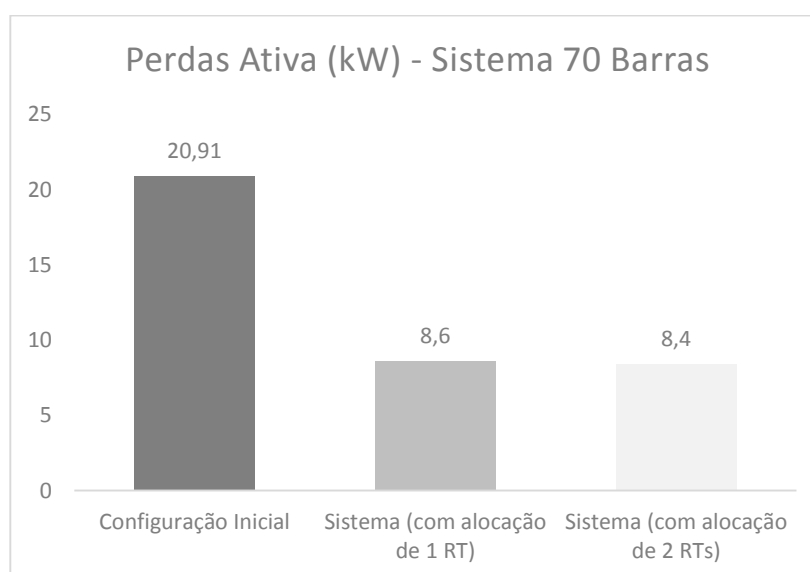


Figura 7.22 – Sistema de 70 barras – Perdas ativas (1 RT e 2 RTs)

Para as simulações deste sistema, estipulou-se um limite mínimo mais agressivo para tensão, 0,98 pu, pois o mesmo já possui um perfil de tensão consideravelmente bom e um limite máximo de 1,05 pu. Nas Figuras 7.23 e 7.24 verificam-se os perfis de tensão do sistema antes e depois da alocação dos reguladores de tensão.

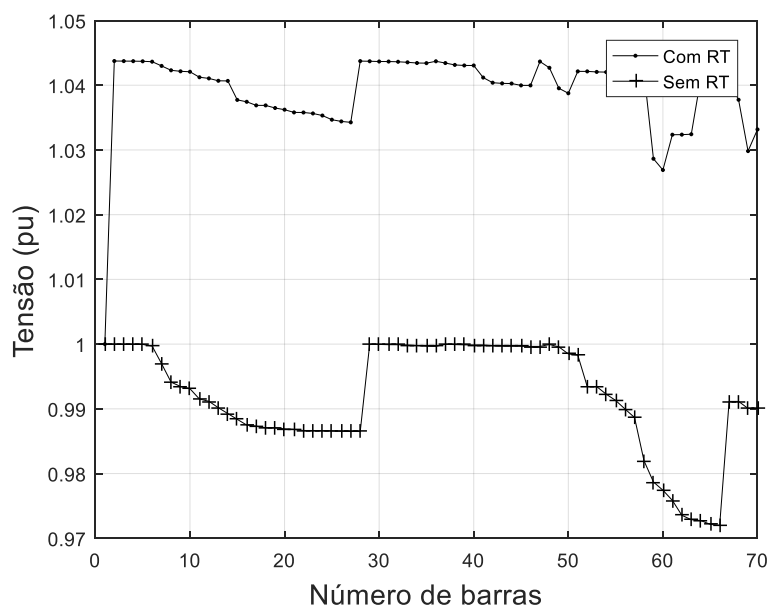


Figura 7.23 – Sistema de 33 barras (1 RT) – Perfil de Tensão (inicial e final)

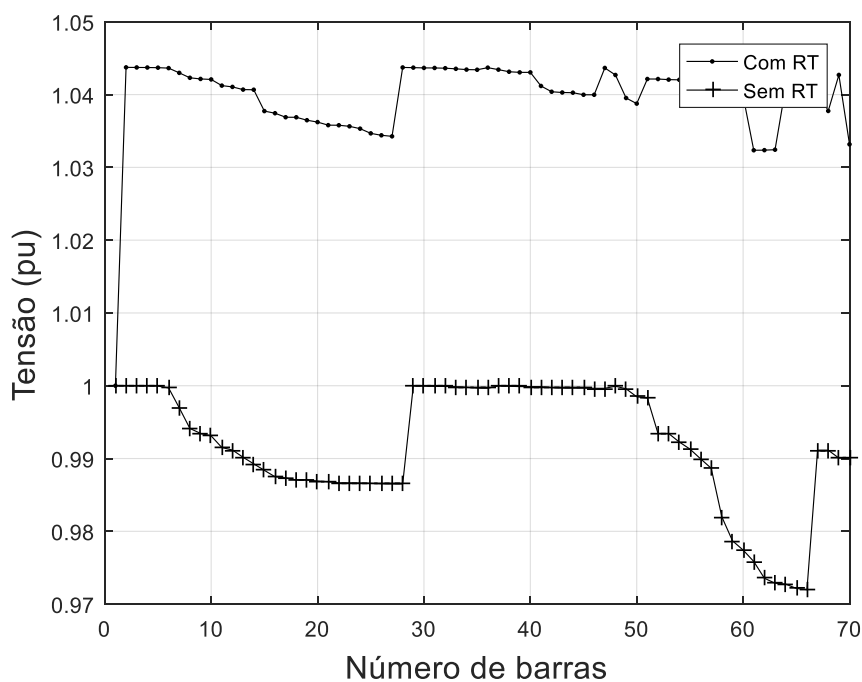


Figura 7.24 – Sistema de 33 barras (2 RTs) – Perfil de Tensão (inicial e final)

Verifica-se a regulação e distribuição das tensões acima da nominal e dentro dos limites especificados, melhorando a qualidade do perfil do sistema.

7.5 COMPARATIVO DOS MÉTODOS IMPLEMENTADOS E SISTEMAS UTILIZADOS (CASO 4):

No método da reconfiguração, a escolha é feita pelos caminhos menos críticos, de menor impedância da linha de distribuição (resistência e reatância), com menores perdas. No método de alocação de reguladores de tensão, o regulador, como o próprio nome diz, irá regular a tensão do sistema, melhorando-a, e consequentemente as perdas. Quando combinados os dois métodos, a melhoria ocorre diretamente ao problema – minimizar as perdas – com a reconfiguração e, indiretamente, na variação da tensão – com a alocação de reguladores de tensão.

Através dos gráficos comparativos à seguir, apresentam-se as análises dos perfis de tensão e dos resultados das perdas de potência ativa dos sistemas de 16, 33, e 70 barras, dos algoritmos implementados para cada método aplicado: reconfiguração, alocação de reguladores de tensão, e alocação de reguladores de tensão após reconfiguração.

7.5.1 Sistema de 16 barras

Verifica-se neste sistema, que o método de alocação de reguladores de tensão apresentou melhor resultado comparando-se com o método de reconfiguração devido o sistema apresentar pouca possibilidade de manobras de chaves, e como a configuração inicial apresenta uma queda de tensão, com a alocação ótima do regulador de tensão, houve melhoria direta na tensão e consequentemente melhoria nas perdas de potência ativa do sistema.

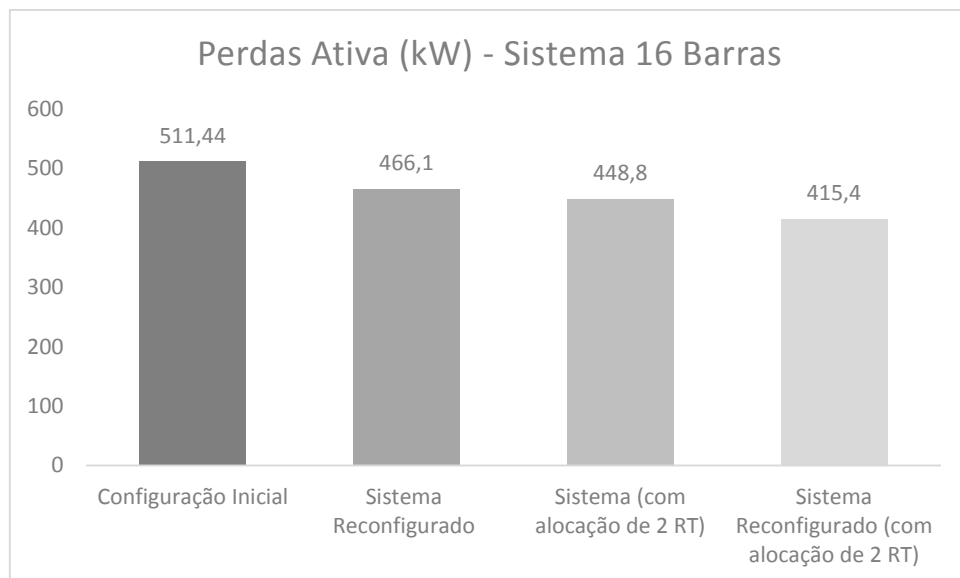


Figura 7.25 – Sistema de 16 barras – Comparação das perdas ativas dos métodos de estudo aplicados

Observa-se nos resultados dos gráficos de barras acima, Figura 7.25, que o sistema após a reconfiguração obteve uma redução das perdas de potência ativa de 8,8 %, enquanto que somente com a alocação de reguladores de tensão houve uma redução de 12,3%, e combinando os dois processos, verifica-se que o sistema obteve uma melhoria expressiva com redução de 18,8%.

7.5.2 Sistema de 33 barras

Verifica-se neste sistema, que por haver mais possibilidade de manobras de chaves, o método de reconfiguração apresentou melhor resultado comparando-se com o método de alocação de reguladores de tensão. Porém, quando combinado os dois métodos, houve uma melhoria significativa nas perdas de potência ativa do sistema.

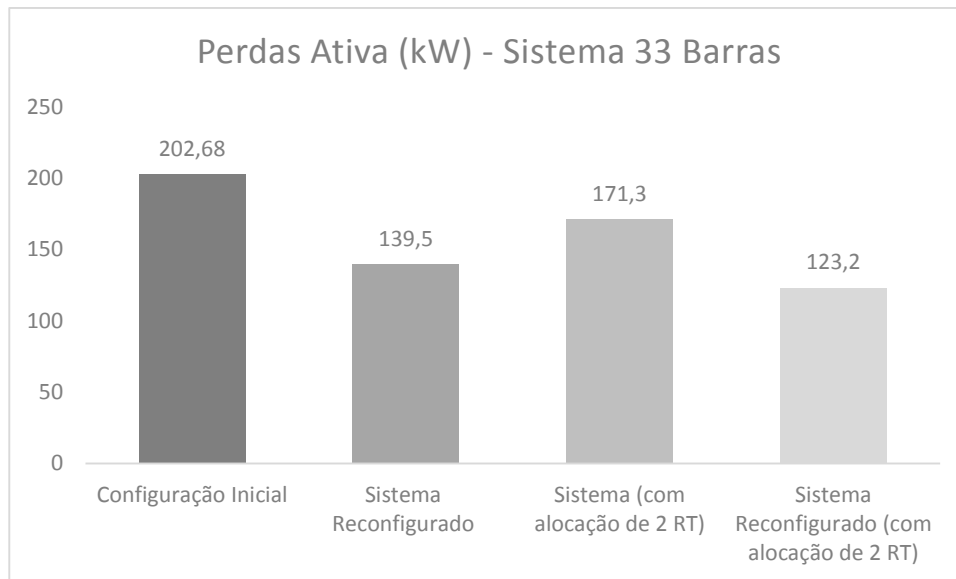


Figura 7.26 – Sistema de 33 barras – Comparação das perdas ativas dos métodos de estudo aplicados

Observa-se nos resultados da Figura 7.26, que o sistema após a reconfiguração obteve uma redução das perdas de potência ativa de 31,2 %, enquanto que somente com a alocação de reguladores de tensão houve uma redução de 15,5%, e combinando os dois processos, verifica-se que o sistema obteve uma melhoria expressiva com redução de 39,2%.

7.5.3 Sistema de 70 barras

Verifica-se neste sistema, que com a alocação do regulador de tensão, o sistema não apresentou grande variação de tensão, pois o mesmo já possui uma boa configuração inicial com um bom perfil de tensão, superior a 0,97 pu, não havendo grande regulação de tensão para este sistema de 70 barras. Já aplicando-se o método da reconfiguração, o sistema apresentou melhor resultado, por haver mais possibilidade de manobras de chaves devido maior quantitativo de barras, encontrando caminhos menos críticos com menores perdas de potência ativa. Verifica-se também, que quando combinado os dois métodos, houve uma expressiva melhoria nas perdas de potência ativa do sistema, comparado às perdas da configuração inicial.

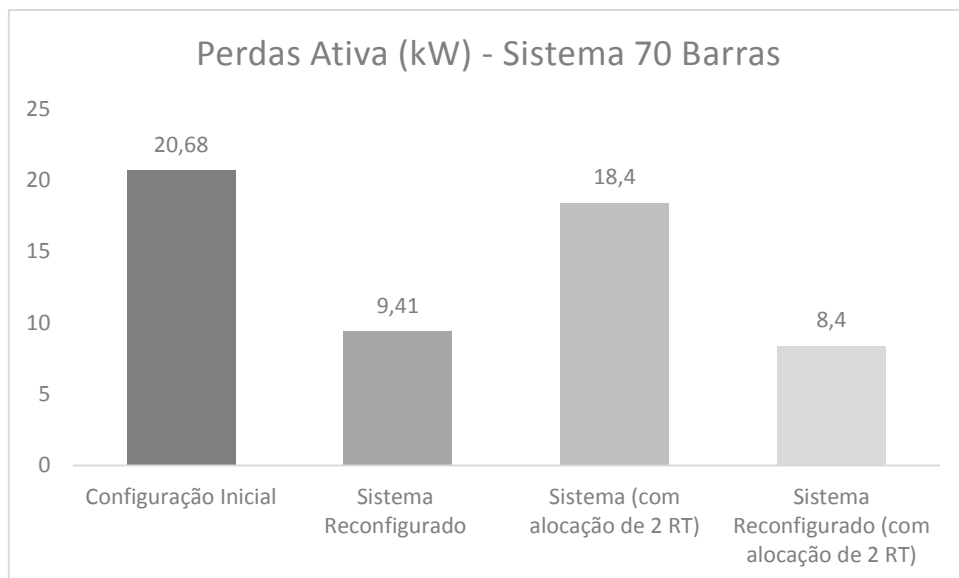


Figura 7.27 – Sistema de 70 barras – Comparação das perdas ativas dos métodos de estudo aplicados

Observa-se nos resultados acima, Figura 7.27, que o sistema após a reconfiguração obteve uma redução das perdas de potência ativa de 55 %, enquanto que somente com a alocação de reguladores de tensão houve uma redução de 12%, e combinando os dois processos, verifica-se que o sistema obteve uma melhoria significativa com redução de 59,8%.

8 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

8.1 CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou uma metodologia para resolver o problema de reconfiguração, alocação e ajustes ótimos de reguladores de tensão no sistema elétrico de distribuição para a redução de perdas, utilizando metaheurística colônia de formigas, baseada no comportamento das formigas na busca por fontes de alimento, onde as mesmas exploram o meio ambiente (rede de distribuição) e em cooperação vão à busca de uma solução que apresente o menor valor de perdas ativas do sistema, encontrando uma solução de boa qualidade.

Para a solução do problema de reconfiguração e alocação de reguladores de tensão em redes elétricas de distribuição, foi desenvolvido um algoritmo baseado no *Ant Colony Optimization*, na variante: *Ant Colony System (ACS)* aplicado ao cálculo da função objetivo. Para o ajuste de tap, utilizou-se o método da soma de potência (MSP) adaptado para o cálculo da diferença e ganho de tensão das barras que possuem reguladores de tensão.

Para verificar o desempenho do algoritmo na solução do problema de reconfiguração, alocação de reguladores de tensão, e a combinação dos dois métodos, foram utilizados sistemas de distribuição de 16, 33 e 70 barras.

Os estudos comparativos dos métodos aplicados, podem servir como ferramentas importantes na avaliação dos sistemas e melhoria do desempenho do método de otimização por colônia de formigas.

A análise dos resultados, indica que os métodos propostos atingiram o objetivo de diminuir as perdas ativas dos sistemas, e melhorar o perfil de tensão de forma a atender os limites especificados pela ANEEL (ANEEL, 2014). Para todos os métodos aplicados, foram obtidos resultados satisfatórios, comprovando a eficiência do algoritmo implementado.

Com os resultados apresentados nesse trabalho, conclui-se que os algoritmos implementados podem ser utilizados como meios para solucionar os problemas de reconfiguração e alocação ótima de reguladores de tensão em sistemas elétricos de distribuição, podendo até ser aplicados como estudo pelas concessionárias de energia elétrica.

8.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

- Aplicar o Algoritmo de Formigas na solução do problema de alocação ótima de reguladores de tensão (RTs) em sistemas de distribuição de energia adicionando à função objetivo a restrição do custo agregado ao equipamento e avaliação da qualidade do perfil de tensão;
- Implementar um algoritmo utilizando metaheurística colônia de formigas que resolva simultaneamente os problemas de reconfiguração e alocação ótima de reguladores de tensão;
- Combinar o Algoritmo de Formigas com outras metaheurísticas e aplicar na solução dos problemas de reconfiguração e alocação de regulador de tensão (RT).
- Aplicar os Algoritmos de Formigas na solução da alocação ótima de reguladores de tensão (RTs) e unidades de geração distribuída (GDs) em sistemas de distribuição de energia;
- Aplicar conjuntamente diferentes estratégias: alocação ótima de geração distribuída (GD), para diminuição da carga do sistema, banco de capacitores (BC), para diminuição do reativo do sistema, e reguladores de tensão (RT), para ajustar a tensão nas barras, com o objetivo de minimizar as perdas de potência ativa do sistema.
- Avaliar o desempenho do método prático de alocação de reguladores de tensão da Figura 4.4, implementado neste trabalho, em relação a outras técnicas de alocação de reguladores de tensão utilizadas nos sistemas de distribuição radiais e na literatura técnica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABDELAZIZ, A. Y.; OSAMA, R. A.; EL-KHODARY, S. M. “*Reconfiguration of distribution system for loss reduction using the hyper-cube ant colony optimization algorithm*”. IEEE Generation, Transmission and Distribution, v.6, n.2, p.176–187. 2012.
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica*. Resolução Normativa nº 641/2014. Brasília, 2014. 75p.
- [3] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. *Resolução N° 505 de 26 de novembro de 2001*. Revogada pela Resolução Normativa ANEEL nº 395 de 15.12.2009.
- [4] ALMEIDA, A. M. F.; BRAZ, H. D. M.; PAMPLONA, F. M. P.; SOUZA, B. A. *Planejamento integrado de bancos de capacitores e reguladores de tensão em redes de distribuição*. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA - CBQEE, 7., 2007, Santos. Anais... Santos: [s.n.], 2007. p. 1-6.
- [5] ALVES M. L., *Módulo de Alocação Otimizada de Reguladores de Tensão e Bancos de Capacitores em Alimentadores de Distribuição*, Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- [6] ALVES R. P., “*Alocação Ótima de Reguladores de Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Radiais Usando uma Formulação Linear Inteira Mista*” Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, 2012, Ilha Solteira, São Paulo.
- [7] AMASIFEN, J.C.C.; ROMERO R. A.; MANTOVANI, J.R.S., *Algoritmo evolutivo dedicado à reconfiguração de redes radiais de distribuição de energia elétrica sob demandas variáveis*. In: Anais do XV Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2004, Gramado – RS, vol. 1, p. 1-6, 2004.
- [8] ARROYO, J.E.C., “*Heurísticas e metaheurísticas para otimização combinatória multiobjetivo*”. 227 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, 2002, Campinas, São Paulo.
- [9] ATANASOVSKI M.; TALESKI R., “*Power summation method for loss allocation in radial distribution networks with dispersed generation*,” in 7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010), Nov 2010, pp. 1–8.
- [10] ATANASOVSKI M.; TALESKI R., “*Power summation method for loss allocation in radial distribution networks with dg*”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 4, pp. 2491–2499, Nov 2011.

- [11] BARAN, M. E.; WU, F. F., “*Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing*”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, V. 4, Berkeley, 1989, pp. 1401-1407
- [12] BARBOSA, A. S., *Fluxo de potência em sistemas de distribuição: aplicações práticas*. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica – Universidade Federal da Paraíba, 1995, Campina Grande, Paraíba.
- [13] BEZERRA U. H.; SOARES T. M.; NUNES M. V. A.; TOSTES M. E. L.; VIEIRA J. P. A.; AGAMEZ P.; VIANA P. R. A.; OLIVEIRA R. C., “Non-technical losses estimation in distribution feeders using the energy consumption bill and the load flow power summation method,” in 2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), April 2016, pp. 1–6.
- [14] BURATTI, R. P., “*Reguladores de Tensão em Redes Elétricas com Alta Penetração de Cargas Não Lineares*” Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, 2016, Ilha Solteira, São Paulo.
- [15] CARVALHO, T. L. A., “*Aplicação de Algoritmos Colônias de Formigas na Reconfiguração e Alocação de Bancos de Capacitores em Redes Elétricas de Distribuição*” Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, 2015, Salvador, Bahia.
- [16] CESPEDES, R.G.; 1990. “*New Method for the analysis of distribution networks*”. *IEEE Trans. PWRD*, vol. 5, n. 1; pp. 391-396.
- [17] CHANG, C. F., “*Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution systems by ant colony search algorithm*”. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 23, n. 1, p. 1747-1755, 2008.
- [18] CHENG, H.C.; KOU, C.C.; 1994. “*Network Reconfiguration in Distribution Systems Using Simulated Annealing*”. *Electric Power Systems Research*, Vol.29, pp.227-238.
- [19] CHIANG, H-D.; JEAN-JUMEAU, R., “*Optimal network reconfigurations in distribution systems: part 2: solution algorithms and numerical results*”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.5, n.3, p.1568-1574, 1990b.
- [20] CIVANLAR, S.; GRAINGER J.; YIN, H., & LEE S., “*Distribution feeder reconfiguration for loss reduction*”. *IEEE Trans. Power Delivery*, 3(3), pp. 1217-1223, July 1988.
- [21] COSTA, J. S., “*Técnicas de Otimização Aplicadas a Sistemas Elétricos de Distribuição*” Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juíz de Fora, 2008, Juíz de Fora, Minas Gerais.
- [22] DORIGO, M.; CARO, G. D.; GAMBARDILLA, L. M., *Ant Algorithms for Discrete Optimization*. *Artificial Life*, v.5, n.2, p.137–172, 1999.
- [23] DORIGO, M.; STUTZLE, T., *Ant colony optimization*. MIT Press, 2004

- [24] DORIGO, M.; STUTZLE, T.; BIRATTARI, M., *Ant colony optimization*. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, December 2006.
- [25] FELBER, L. A., “*Regulação de Tensão em Subestações de Distribuição de Energia Elétrica*” Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, 2010, Itajubá, Minas Gerais.
- [26] FELÍCIO J. R., *Modelagem de Regulador de Tensão Monofásico com 32 Degraus para Estudos em Regime Permanente e Transitório*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- [27] FRAGA, M. C. P., *Uma Metodologia Híbrida Colônia de Formigas – Busca Tabu – Reconexão por Caminhos para Resolução do Problema de Roteamento de Veículos com Janelas de tempo*. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte, Brasil. CEFET – MG, 2006.
- [28] FRANCO, J. F.; ROMERO, R., Planejamento da operação de sistemas de distribuição considerando a alocação ótima de capacitores e reguladores de tensão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - SBSE, 3., 2010, Belém. Simpósio... Belém: [s.n.], 2010. p. 1-6.
- [29] GLOVER, F. W.; KOCHENBERGER, G. A., “*Handbook of Metaheuristics*”, 2003.
- [30] GUIMARÃES, M. A. N.; CASTRO, C.A., “*Reconfiguration of distribution system for loss reduction using tabu search*”. Proc. 2005 IEEE Power System Computation Conference, v.1, p.1-6, Aug. 2005.
- [31] GUTTERRES, J.G.G., “*Cálculo do fluxo de carga em redes de distribuição radiais com geração distribuída utilizando o método da soma de potências modificado*”. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, 2006, Campina Grande, Paraíba.
- [32] HORA, T. N.; CARVALHO T. L. A.; FERREIRA N. R., “*Método da Soma de Potência para Redes de Distribuição contendo Reguladores de Tensão*”, VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, Maio 2018.
- [33] HSU, Y.Y.; HUANG, M.M.; KUO, H.C.; PENG, S.K.; CHANG, C.W.; CHANG, K.J.; YU, H.S.; CHOW, C.E., R.T.; 1992. “*Distribution System Service Restoration Using a Heuristic Search Approach*”. *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol.7 No 2, pp. 734-740.
- [34] LIN, W.M.; CHENG, F.S.; TSAY, M.T.; 2000. “*Distribution Feeder Reconfiguration with Refined Genetic Algorithm*”. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 147 No 6, pp. 349-354.
- [35] MADRUGA, E. P., “*Otimização de Níveis de Tensão nas Redes de Distribuição considerando a Alocação de Bancos de Capacitores e Reguladores de Tensão*” Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2011, Santa Maria, Rio Grande do Sul.

- [36] MANTOVANI, J. R. S.; CASARI, F.; ROMERO, R. A., “Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Radiais Utilizando o Critério de Queda de Tensão”. *Revista Controle e Automação*, Vol. 11, N° 3, PP. 150-159, 2000.
- [37] MASHHOUR, E.; TAFRESHI, S. M. M., “*Three-phase backward/forward power flow solution considering three-phase distribution transformers*”, in 2009 IEEE International Conference on Industrial Technology, Feb 2009, pp. 1–5.
- [38] MCDERMOTT, T. E.; DREZGA, I.; BROADWATER, R. P., “*A heuristic nonlinear constructive method of distribution system reconfiguration*”. *IEEE Transactions on Power System*, vol. 14, n° 2, pp. 478-483, may 1999.
- [39] MELIÁN, B.; PÉREZ, J. A. M.; VEGA, M. M., *Metaheuristics: A Global View*. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, v.2, n.19, p.7–28, 2003.
- [40] MENDOZA, J.; LÓPEZ, E.; MORALES, D.; LÓPEZ, R.; LÓPEZ, M.; and VANNIER J, C., “*Optimal Location of Voltage Regulators in Radial Distribution Networks Using Genetic Algorithms*” University of Concepción, Concepción, Chile and École Supérieure d’Électricité, Paris, France, 2007.
- [41] NETO, M. P. S., “*Reconfiguração de Sistemas Elétricos de Distribuição Utilizando Algoritmos Híbridos*” Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, 2014, Salvador, Bahia.
- [42] NETO, M. P. S.; FERREIRA, N. R.; 2014a. “*Reconfiguração de Sistemas Elétricos de Distribuição Utilizando Colônia de Formigas com Busca Tabu*”. V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Foz do Iguaçu, Paraná.
- [43] NETO, M.P.S.; SANTOS L. L.; FERREIRA, N.R.; 2014b. “*Reconfiguração de Sistemas Elétricos de Distribuição Utilizando Simulated Annealing Combinado com Algoritmo de Formigas*”. V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Foz do Iguaçu, Paraná.
- [44] NETO, M.P.S., FERREIRA, N.R.; 2014c. “*Reconfiguração de Sistemas Elétricos de Distribuição Utilizando Algoritmo de Formigas com Método de Aceleração*”. V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Foz do Iguaçu, Paraná.
- [45] NUNES, J. U. N.; BRETAS A. S., “*Alocação Ótima de Reguladores de Tensão em Sistemas de Distribuição Baseada na Busca Tabu*”. SBSE, 2016.
- [46] OLIVEIRA, L. M., *Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica para Minimização de Perdas Ativas Totais via Otimização por Enxame de Partículas (PSO)*. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- [47] OLIVEIRA, L. W., *Reconfiguração e Alocação Ótima de Capacitores em Sistemas de Distribuição*. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro, Brasil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- [48] PADILHA, L. N., “*Análise Comparativa de Estratégias para Regulação de Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica na Presença de*

- Geradores Distribuídos*” Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, 2010, São Carlos, São Paulo.
- [49] PEREIRA C. A. N., “*Alocação Ótima de Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição de Energia Elétrica*” Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, 2009, Campinas, São Paulo.
- [50] PERREIRA, F. S., “*Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica baseado no comportamento de colônia de formigas*”. 105 f. Tese (Doutorado) – Escola de engenharia de são Carlos, Universidade de São Paulo, 2010, São Paulo.
- [51] PEREIRA, F. S.; VITTORI, K.; DA COSTA, G.R.M.; 2006. “*Distribution System Reconfiguration for Loss Reduction based on Colony Behavior*”. *IEEE PES Transaction and Distribution Conference and Exposition Latin America*, Venezuela.
- [52] PEREIRA, F. S.; VITTORI, K; DA COSTA, G. R. M., “*Colony based method for reconfiguration of power distribution system to reduce losses*”. In: 2008 IEEE/PES Transmission And Distribution Conference And Exposition: Latin America, Bogota, p. 1-5, ago. 2008.
- [53] RESENER M.; “*Alocação e Ajuste Ótimo de Reguladores de Tensão em Sistemas de Distribuição*” Projeto de Diplomação – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008, Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- [54] RODRIGUES A. R.; *Regulador de Tensão com Comutação Eletrônica de Taps – Análise de Operação e Proteção das Chaves Estáticas*, Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- [55] SANCA, H. S., “*Reconfiguração Ótima de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Aplicando o Algoritmo MAX-MIN Ant System*” Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, 2013, Salvador, Bahia.
- [56] SHORT T. A., “*Electric Power Distribution Handbook*”, New York: CRC Press, 2003.
- [57] SHORT, T. A., “*Electric Power Distribution Handbook*”. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2004. 762p.
- [58] SILVA I. C. A., “*Heuristic Constructive Algorithm for Capacitor Placement on Distribution System*”. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v.23, n.4, p.1619-1626, Nov. 2008.
- [59] SOUZA, B. A.; *Como Funciona o MSP e o Que Precisa ser Modificado?* Apostila do curso de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande. Paraíba, 2005. 13 p.
- [60] SOUZA, B. A.; NETO, J. P. C.; LEITE, M. F.; VITTORI, K.; “*Configuração de redes de distribuição via algoritmo de formigas*”. SBAI, 2009.

- [61] SOUZA, B. A.; SILVA, J. P. S.; FERREIRA, N. R.; “*Configuração Ótima de Redes de Distribuição Aplicando um Algoritmo Colônia de Formigas*”. *IEEE PES Transmission and Distribution Latin America Conference and Exposition*, 2010, São Paulo.
- [62] SOUZA, B. A.; SILVA, J. P. S.; FERREIRA, N. R.; 2011. “*Aplicação de Algoritmo Colônia de Formigas na Reconfiguração de Redes Elétricas de Distribuição*”. *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, pp. 1-6, São João del Rei-MG.
- [63] SOUZA, R. F. F., “*Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição Usando a Metaheurística de Busca em Vizinhança Variável*”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira,, 2011.
- [64] SUGIMOTO, J.; YOKOYAMA, R.; FUKUYAMA, Y.; SILVA, V. V. R.; SASAKI, H., *Coordinated allocation and control of voltage regulators based on reactive tabu search*. *Power Tech*, Russia, p. 1-6, june 2005. Doi: 10.1109/PTC.2005.4524739, 2005.
- [65] SZUVOVIVSKI, I.; FERNANDES, T. S. P.; AOKI, A. R.; “*Alocação de Reguladores de Tensão em Sistemas de Distribuição Usando Algoritmos Genéticos e Fluxo de Potência Ótimo*”. SENDI, 2008.
- [66] TORRES, L. M.; ALVES, H. N.; “*Alocação Ótima de Banco de Capacitores Utilizando a Meta-Heurística Colônia de Formigas*”. *Congresso Norte e Nordeste de Pesquisa e Inovação*, 2012.
- [67] VITORINO, R. M.; NEVES, L. P.; JORGE, H. M.; “*Network Reconfiguration to Improve Reliability and Efficiency in Distribution Systems*”. *IEEE Bucharest Power Tech Conference*, 2009.
- [68] WAGNER, T. P.; CHIKHANI, A. Y.; HACKAM, R.; 1991. “*Feeder Reconfiguration from Loss Reduction: An Application of Distribution automation*”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.6 No 4, pp. 1922-1933.
- [69] ZVIETCOVICH, W. G.; “*Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando a Metaheurística Busca Tabu em Vizinhança Variável*”. 2006. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2006.

APÊNDICE A**DADOS DOS SISTEMAS TESTADOS****A1 – SISTEMA 16 BARRAS**

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Carga barra final (MW)	Carga barra final (Mvar)
11	1	4	0,075	0,1	2	1,6
12	4	5	0,08	0,11	3	1,5
13	4	6	0,09	0,18	2	0,8
14	6	7	0,04	0,04	1,5	1,2
16	2	8	0,11	0,11	4	2,7
18	8	9	0,08	0,11	5	3
17	8	10	0,11	0,11	1	0,9
19	9	11	0,11	0,11	0,6	0,1
20	9	12	0,08	0,11	4,5	2
22	3	13	0,11	0,11	1	0,9
24	13	14	0,09	0,12	1	0,7
23	13	15	0,08	0,11	1	0,9
25	15	16	0,04	0,04	2,1	1
15	5	11	0,04	0,04		
21	10	14	0,04	0,04		
26	7	16	0,09	0,12		

A1 – SISTEMA 33 BARRAS

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Carga barra final (kW)	Carga barra final (kVar)
1	1	2	0,0922	0,047	100	60
2	2	3	0,493	0,2511	90	40
3	3	4	0,366	0,1864	120	80
4	4	5	0,3811	0,1941	60	30
5	5	6	0,819	0,707	60	20
6	6	7	0,1872	0,6188	200	100
7	7	8	0,7114	0,2351	200	100
8	8	9	1,03	0,74	60	20
9	9	10	1,044	0,74	60	20
10	10	11	0,1966	0,065	45	30
11	11	12	0,3744	0,1238	60	35
12	12	13	1,468	1,155	60	35
13	13	14	0,5416	0,7129	120	80
14	14	15	0,591	0,526	60	10
15	15	16	0,7463	0,545	60	20
16	16	17	1,289	1,721	60	20
17	17	18	0,732	0,544	90	40
18	2	19	0,164	0,1565	90	40
19	19	20	1,5042	1,3554	90	40
20	20	21	0,4095	0,4784	90	40
21	21	22	0,7089	0,9373	90	40
22	3	23	0,4512	0,3083	90	50
23	23	24	0,898	0,7091	420	200
24	24	25	0,896	0,7011	420	200
25	6	26	0,203	0,1034	60	25
26	26	27	0,2842	0,1447	60	25
27	27	28	1,059	0,9337	60	20
28	28	29	0,8042	0,7006	120	70
29	29	30	0,5075	0,2585	200	600
30	30	31	0,9744	0,963	150	70
31	31	32	0,3105	0,3619	210	100
32	32	33	0,341	0,5301	60	40
33	8	21	2	2		
34	9	15	2	2		
35	12	22	2	2		
36	18	33	0,5	0,5		
37	25	29	0,5	0,5		

A1 – SISTEMA 70 BARRAS

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Carga barra final (kW)	Carga barra final (kVar)
1	1	2	0,0005	0,0012	0	0
2	2	3	0,0005	0,0012	0	0
3	3	4	0	0	0	0
4	4	5	0,0015	0,0036	0	0
5	5	6	0,0251	0,0294	0	0
6	6	7	0,366	0,1864	0,878	0,72
7	7	8	0,3811	0,1941	13,455	0,72
8	8	9	0,0922	0,047	24,887	17,81
9	9	10	0,0493	0,0251	10	7,208
10	10	11	0,819	0,2707	9,333	6,666
11	11	12	0,1872	0,0619	48,5	34,609
12	12	13	0,7114	0,2351	48,5	34,609
13	13	14	1,03	0,34	2,71	1,821
14	14	15	1,044	0,345	2,71	1,521
15	15	16	1,058	0,3496	0	0
16	16	17	0,1966	0,065	15,176	10,198
17	17	18	0,3744	0,1238	16,5	11,775
18	18	19	0,0047	0,0016	16,5	11,775
19	19	20	0,3276	0,1083	0	0
20	20	21	0,2106	0,0696	0,316	0,212
21	21	22	0,3416	0,1129	37,983	27,1
22	22	23	0,014	0,0046	1,762	1,184
23	23	24	0,1591	0,0526	0	0
24	24	25	0,3463	0,1145	9,39	6,67
25	25	26	0,7488	0,2475	0	0
26	26	27	0,3089	0,1021	4,667	3,33
27	27	28	0,1732	0,0572	4,667	3,3301
28	3	29	0,0044	0,0108	8,667	6,185
29	29	30	0,064	0,1565	8,667	6,185
30	30	31	0,3978	0,1315	0	0
31	31	32	0,0702	0,0232	0	0
32	32	33	0,351	0,116	0	0
33	33	34	0,839	0,2816	4,582	3,26
34	34	35	1,708	0,5646	6,501	5,549
35	35	36	1,474	0,4873	1,92	1,29
36	4	37	0,0044	0,0108	8,667	6,185
37	37	38	0,064	0,1565	8,667	6,185
38	38	39	0,1053	0,123	0	0
39	39	40	0,0304	0,0355	8	5,709
40	40	41	0,0018	0,0021	8	5,709
41	41	42	0,7283	0,8509	0,392	0,325
42	42	43	0,31	0,3623	0	0
43	43	44	0,041	0,0478	2	1,427
44	44	45	0,0092	0,0116	0	0
45	45	46	0,1089	0,1373	3,076	8,787

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Carga barra final (kW)	Carga barra final (kVar)
46	46	47	0,0009	0,0012	3,076	8,787
47	5	48	0,0034	0,0084	0	0
48	48	49	0,0851	0,2083	26,35	18,8
49	49	50	0,2898	0,7091	28,226	91,492
50	50	51	0,0822	0,2011	128,226	91,492
51	9	52	0,0928	0,0473	13,512	9,442
52	52	53	0,3319	0,1114	1,202	0,894
53	10	54	0,174	0,0886	1,449	1,162
54	54	55	0,203	0,1034	8,787	6,322
55	55	56	0,2842	0,1447	8	5,708
56	56	57	0,2813	0,1433	0	0
57	57	58	1,59	0,5337	0	0
58	58	59	0,7837	0,263	0	0
59	59	60	0,3042	0,1006	0,667	24,025
60	60	61	0,3861	0,1172	0	0
61	61	62	0,5075	0,2555	414,667	295,91
62	62	63	0,974	0,0496	10,667	7,612
63	63	64	0,145	0,0738	0	0
64	64	65	0,7105	0,3619	75,67	53,873
65	65	66	1,041	0,5302	19,67	13,912
66	12	67	0,2012	0,0611	6	4,282
67	67	68	0,0047	0,0014	6	4,282
68	13	69	0,7394	0,2444	9,333	6,66
69	69	70	0,0047	0,0016	9,333	6,6604
70	12	44	0,5	0,5		
71	14	22	0,5	0,5		
72	16	47	1	1		
73	51	60	2	2		
74	28	66	1	1		