

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**EDUARDO ANGIEUSKI VAZ**

**PROJETO DE DIPLOMAÇÃO**

**AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO USO DE INTELIGÊNCIA DE  
ABELHAS NO PLANEJAMENTO EM UM ESTÁGIO DA  
EXPANSÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA**

Porto Alegre

2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO USO DE INTELIGÊNCIA DE  
ABELHAS NO PLANEJAMENTO EM UM ESTÁGIO DA  
EXPANSÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA**

Projeto de Diplomação apresentado ao  
Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos  
requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Sérgio Haffner

Porto Alegre

2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

EDUARDO ANGIEUSKI VAZ

**AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO USO DE INTELIGÊNCIA DE  
ABELHAS NO PLANEJAMENTO EM UM ESTÁGIO DA  
EXPANSÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Sérgio Haffner, UFRGS

Engenheiro Eletricista (PUCRS – Porto Alegre, Brasil)

Banca Examinadora:

Professor Sérgio Haffner, UFRGS

Doutor pela UNICAMP – Campinas, Brasil

Professora Gladis Bordin, UFRGS

Doutora pela UFSC – Florianópolis, Brasil

Professor Luís Alberto Pereira, UFRGS

Doutor pela Universität Kaiserslautern – Kaiserslautern, Alemanha

Porto Alegre, julho de 2011.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a todas as pessoas que acreditaram em mim, e me apoiaram ao longo de toda minha vida.

Em especial dedico aos meus pais, por seu amor infinito.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, por todo o carinho, compreensão e apoio que deles recebi durante minha jornada.

Ao professor Sérgio Haffner, pelo auxílio fornecido neste projeto.

À Simone, por sua verdadeira dedicação.

Ao Sergei, por não me deixar desistir com tanta sabedoria.

Aos amigos, que entenderam as dificuldades encontradas e me ajudaram a superá-las.

## RESUMO

O planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica é um problema complexo. Este problema envolve a análise combinatória de diversas possibilidades de expansão, usando um método que leve a um mínimo custo total. Estudos recentes em alguns problemas de análise combinatória de soluções têm mostrado bons resultados para um algoritmo de fácil aplicabilidade baseado em inteligência de enxames. Este algoritmo é conhecido como o Algoritmo das Abelhas. Este trabalho foi desenvolvido para analisar a aplicabilidade de um sistema de cálculo baseado nesse algoritmo de inteligência de enxames à solução do problema da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica.

**Palavras-chave:** Engenharia Elétrica. Inteligência de enxames. Expansão do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica. Algoritmo das Abelhas.

## **ABSTRACT**

The planning of the expansion of electrical energy transmission system is a complex problem. This problem involves the combinatorial analysis of several expansion possibilities, using a method that takes to a minimum total cost. Recent studies in some problems that involve combinatorial analysis of solutions have shown good results for an algorithm based in swarm intelligence. This algorithm is known as Bees Algorithm. This work was developed to analyze the use of a calculus system based on this algorithm of swarm intelligence to the solution of the electrical energy transmissions systems expansion problem.

**Keywords: Electrical Engineering, Swarm Intelligence, Electrical Energy Transmission System Expansion, Bees Algorithm.**

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1. Motivação .....	13
1.2. Apresentação do problema .....	14
1.3. Objetivos .....	15
1.4. Estrutura do trabalho .....	15
<b>2. CONTEXTO</b> .....	<b>17</b>
<b>3. ANÁLISE DE ALTERNATIVAS</b> .....	<b>19</b>
3.1. Período de avaliação.....	19
3.2. Técnica de otimização. ....	20
3.3. Avaliação das soluções. ....	21
<b>4. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DA EXPANSÃO EM UM ESTÁGIO</b> .....	<b>22</b>
4.1. O problema de investimento.....	24
4.2. O problema de operação .....	28
<b>5. MÉTODO DE SOLUÇÃO DESENVOLVIDO</b> .....	<b>30</b>
5.1. Método de busca para o problema de investimento .....	30
5.1.1. Algoritmo das abelhas .....	30
5.1.2. Ajustes dos parâmetros .....	32
5.1.3. Critérios de avaliação.....	34
5.1.4. Melhorias do algoritmo base das abelhas.....	35
5.1.4.1. Busca dinâmica.....	35
5.1.4.2. Interrupção das buscas aleatórias .....	36
5.1.4.3. Buscas aleatórias com probabilidades.....	36
5.1.4.4. Busca lateralizada .....	36
5.2. Método de despacho – Modelo CC.....	37
<b>6. ESTUDOS DE CASO</b> .....	<b>40</b>
6.1. Sistema de Garver (sem redespacho) – Método base .....	40
6.2. Sistema de Garver (sem redespacho) – Busca dinâmica.....	42
6.3. Sistema de Garver (com redespacho) – Busca dinâmica .....	47
6.4. Sistema de Garver (sem redespacho) – Interrupção das buscas aleatórias ..	51
6.5. Sistema de Garver (sem redespacho) – Soluções aleatórias com diferentes probabilidades.....	54
6.6. Sistema de Garver (sem redespacho) – Busca lateralizada .....	57
<b>7. ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>61</b>
<b>8. APLICAÇÃO DO MÉTODO A SISTEMAS MAIS COMPLEXOS</b> .....	<b>63</b>
<b>9. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>64</b>



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Divisão do problema. ....	24
Figura 2. Fluxograma da busca por melhores soluções. ....	26
Figura 3. Fluxograma do algoritmo de abelhas base. ....	31
Figura 4. Fluxograma do algoritmo das abelhas com busca dinâmica. ....	35
Figura 5. Soluções iniciais. ....	41
Figura 6. 1ª Iteração. ....	41
Figura 7. 2ª Iteração. ....	41
Figura 8. 3ª Iteração. ....	41
Figura 9. 4ª Iteração. ....	41
Figura 10. 138ª Iteração. ....	41
Figura 11. 139ª Iteração. ....	42
Figura 12. 200ª Iteração. ....	42
Figura 13. Soluções iniciais. ....	43
Figura 14. 1ª Iteração. ....	43
Figura 15. 2ª Iteração. ....	43
Figura 16. 37ª Iteração. ....	43
Figura 17. 38ª Iteração. ....	44
Figura 18. 200ª Iteração. ....	44
Figura 19. Evolução da convergência. ....	45
Figura 20. Evolução da convergência – 20ª a 200ª Iteração. ....	46
Figura 21. Evolução da convergência – 10ª a 50ª Iteração. ....	46
Figura 22. Solução inicial. ....	48
Figura 23. 1ª Iteração. ....	48
Figura 24. 2ª Iteração. ....	48
Figura 25. 38ª Iteração. ....	48
Figura 26. 39ª Iteração. ....	49
Figura 27. 70ª Iteração. ....	49
Figura 28. Evolução da convergência. ....	50
Figura 29. Evolução da convergência – 10ª a 50ª Iteração. ....	50
Figura 30. Solução inicial. ....	51
Figura 31. 1ª Iteração. ....	51
Figura 32. 19ª Iteração. ....	52
Figura 33. 20ª Iteração. ....	52
Figura 34. 21ª Iteração. ....	52
Figura 35. 50ª Iteração. ....	52
Figura 36. Evolução da convergência. ....	53
Figura 37. Evolução da convergência – 5ª a 30ª Iterações. ....	54
Figura 38. Soluções iniciais. ....	55
Figura 39. 1ª Iteração. ....	55
Figura 40. 6ª Iteração. ....	55
Figura 41. 50ª Iteração. ....	55
Figura 42. Evolução da convergência – 1ª a 50ª Iterações. ....	56
Figura 43. Evolução da convergência – 5ª a 50ª Iterações. ....	57
Figura 44. Solução inicial. ....	58
Figura 45. 1ª Iteração. ....	58
Figura 46. 9ª Iteração. ....	58
Figura 47. 11ª Iteração. ....	58
Figura 48. 17ª Iteração. ....	59

Figura 49. 20ª Iteração.....	59
Figura 50. Evolução da convergência – 2ª a 20ª Iterações. ....	60
Figura 51. Topologia base do Sistema Sul – Brasileiro. ....	76
Figura 52. Topologia inicial do Sistema de Garver.....	82
Figura 53. População inicial aleatória. ....	87
Figura 54. Avaliação da qualidade. ....	87
Figura 55. Buscas nas vizinhanças. ....	88
Figura 56. Escolhidas as melhores fontes de cada região e descartadas as outras. ....	88
Figura 57. Novas buscas aleatórias.....	89
Figura 58. Processo iterativo. ....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos de Solução.....	26
Tabela 2 - Solução de Garver sem Redespacho. ....	40
Tabela 3 – Solução de Garver com Redespacho. ....	47
Tabela 4 – Sistema 46 barras – Dados de linha. ....	77
Tabela 5 – Sistema 46 barras – Dados de barra.....	79
Tabela 6 – Sistema de Transmissão de Garver.....	80
Tabela 7 – Demanda de Garver .....	80
Tabela 8 – Geração do Sistema de Garver .....	80
Tabela 9 – Geração com redespacho do Sistema de Garver.....	80

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

DELET: Departamento de Engenharia Elétrica

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

MME: Ministério de Minas e Energia

EPE: Empresa de Pesquisa Energética

PET: Programa de Expansão da Transmissão

LT: Linha de Transmissão

SE: Subestação

UHE: Usina Hidrelétrica

PIB: Produto Interno Bruto

SIN: Sistema Interligado Nacional

SEB: Sistema Elétrico Brasileiro

CC ou DC: Corrente Contínua

CA: Corrente Alternada

S.A.: Sujeito a

FACTS: Flexible AC Transmission Systems

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. MOTIVAÇÃO

Os sistemas elétricos possuem, em geral, a necessidade de serem readequados constantemente. Isso ocorre devido a alterações de seus perfis, o que ocorre devido a diversos fatores. Pode-se citar, dentre eles, o crescimento populacional e da atividade industrial, a migração de populações e de indústrias, o desenvolvimento de novas tecnologias de geração de energia elétrica, etc.

No caso brasileiro, a demanda por energia elétrica tem apresentado um crescimento rápido ao longo das últimas décadas. Este crescimento leva a uma contínua necessidade de expansão de todos os sistemas energéticos do país.

Para suprir esta demanda crescente, há uma clara necessidade de aumento das capacidades de geração de energia, da transmissão dela, entre outras necessidades. Estes aumentos das capacidades, chamados, em geral, de expansão dos sistemas energéticos, passam por diversos estudos, tais como previsões de demanda, novas possibilidades de fontes geradoras, seus impactos ambientais, etc.

A expansão dos sistemas energéticos apresenta um elevado custo, além de causar um grande impacto ambiental e na vida da população. Por isso é desejável que tal expansão seja feita de forma a reduzir os custos e o impacto de sua implantação. Ao estudo feito para minimizar esses fatores, dentro de padrões que possam atender à demanda, é dado o nome de otimização.

Esta otimização está presente em todas as partes da expansão dos sistemas elétricos. Este fato leva à necessidade do desenvolvimento de métodos para realizar a otimização das readequações necessárias dos sistemas elétricos. Há, portanto, uma grande necessidade de novos métodos para auxílio nos cálculos e estratégias realizadas para a expansão do sistema.

O resultado do desenvolvimento de novos e melhores métodos para planejamento da expansão dos sistemas elétricos é a redução dos custos necessários tanto para seu planejamento quanto para sua instalação. Além disso, há um aumento da confiabilidade dos sistemas elétricos, o que leva a um maior conforto de toda a população e aumenta a competitividade produtiva do país em qualquer setor.

## **1.2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA**

No caso brasileiro, a energia elétrica é a principal forma de abastecimento para as diversas necessidades de energia. Para isso existem diversas unidades geradoras de energia elétrica, com predomínio na matriz energética das usinas hidrelétricas. As hidrelétricas têm como característica intrínseca seu distanciamento das unidades consumidoras. Esse distanciamento leva à necessidade de sistemas de transmissão elétrica.

Os sistemas de transmissão elétrica presentes em praticamente todo o território nacional são interligados, formando o Sistema Interligado Nacional (SIN). Tal sistema apresenta características complexas devido ao seu tamanho. O tamanho do sistema é comumente medido pelo número de componentes deste, como linhas de transmissão (LT) e subestações (SE). Mesmo quando dividido em subsistemas para sua análise, estes subsistemas ainda tem um número relativamente elevado de componentes.

A grande quantidade de LT, SE, unidades geradoras e interligações entre elas na composição do SIN e de seus subsistemas, lhe conferem uma maior confiabilidade. As dimensões dos sistemas levam, porém, a uma maior complexidade na análise de sua estrutura e no seu planejamento.

Uma característica comum a diversos métodos de planejamento da expansão dos sistemas elétricos é a análise comparativa de soluções propostas. Esta análise comparativa de diversas soluções leva ao desenvolvimento de estratégias para propor boas soluções, que

possam ser melhores às aquelas já conhecidas. O desenvolvimento de métodos para análise de cada solução também afeta a velocidade e a qualidade com que a análise comparativa poderá concluir sobre a melhor solução de cada problema.

### **1.3. OBJETIVOS**

Deseja-se com este trabalho desenvolver um método de busca pela solução ótima de problemas de expansão em um estágio de um sistema de transmissão elétrica baseado em inteligência de enxames.

Espera-se com isso obter um método de fácil aplicação a diversos problemas de expansão de sistemas de transmissão e também a outros tipos de sistemas.

### **1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO**

Para alcançar os objetivos propostos, o trabalho está estruturado em nove capítulos, incluindo este introdutório.

O Capítulo 2 apresenta o contexto do projeto, indicando os agentes do sistema responsáveis pelo estudo presente neste trabalho e suas formas de atuação.

O Capítulo 3 mostra uma análise das alternativas para a solução do problema proposto. Esta análise é feita com base na revisão bibliográfica relacionada.

O Capítulo 4 explica a formulação do problema da expansão em um estágio, para o qual se deseja desenvolver um método de solução.

O Capítulo 5 trata do desenvolvimento do método proposto. São descritos em detalhes cada etapa do processo de construção do método.

O Capítulo 6 reproduz os resultados de estudos de caso. O objetivo destes estudos é mostrar o comportamento do método em cada configuração proposta em seu desenvolvimento. Objetiva-se também apresentar a capacidade do método na solução de problemas como aqueles em que ele é aplicado.

O Capítulo 7 faz uma avaliação dos resultados obtidos da aplicação do método desenvolvido. Uma análise comparativa visa compreender as qualidades e defeitos do método, e também a melhor forma de aplicá-lo.

O Capítulo 8 refere-se à aplicação do método a sistemas mais complexos.

O Capítulo 9 aponta as últimas considerações sobre o projeto realizado.



## 2. CONTEXTO

Um sistema de transmissão é composto por diversos componentes, como linhas de transmissão e subestações transformadoras. A função das linhas de transmissão é ligar as unidades geradoras de energia às subestações e, também, alimentar consumidores de grande porte.

A característica sazonal intrínseca à geração hidroelétrica, que é predominante no país, associada à produção de energias mais caras, como em usinas termelétricas e fontes alternativas, faz com que seja desejável a gestão ótima da utilização dos recursos de cada fonte de energia.

Para atingir essa utilização ótima dos recursos, minimizando seu custo e também aumentando a confiabilidade de todo o sistema, construiu-se no Brasil um sistema interligado e malhado. Este é o Sistema Interligado Nacional (SIN), que devido ao seu tamanho e às plurais características de geração pode ser considerado único em escala mundial (ONS, 2011).

A demanda brasileira por energia elétrica tem apresentado alto crescimento. Este crescimento tem relações complexas com fatores como o aumento da atividade industrial, do PIB, da população, entre outros.

A característica única do SIN e a crescente demanda nacional levam o país a um pioneirismo nos estudos e na produção de novas tecnologias para a expansão dos sistemas elétricos, tanto na previsão da demanda, quanto na geração, na transmissão e também na operação. Desta forma as principais referências sobre o tema abordado vêm de fontes como as empresas governamentais Aneel, Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e Eletrobrás, concessionárias de distribuição de energia e de trabalhos acadêmicos desenvolvidos em todo o país.

A EPE, empresa do Ministério de Minas e Energia (MME), é uma empresa relativamente nova, com data de criação no ano de 2004. A responsabilidade desta empresa é

realizar o planejamento do setor energético. Uma das áreas deste planejamento trata da expansão do sistema elétrico.

Em conjunto com empresas de transmissão, a EPE elabora anualmente o Programa de Expansão da Transmissão (PET) (EPE, 2011). Estes estudos apresentam os novos componentes do sistema de transmissão necessários (LT e SE) durante os cinco anos seguintes. Este horizonte de planejamento é considerado de curto prazo.

Os estudos de médio prazo podem ser vistos nos Planos Decenais de Expansão de Energia, também realizados pela EPE. Estes estudos contemplam além da expansão necessária ao sistema de transmissão, a expansão da geração de energia. A expansão da geração neste horizonte trata das usinas termoeletricas, enquanto a expansão da transmissão inclui linhas para inclusão das obras de geração, com término previsto dentro desse prazo de dez anos.

Os estudos de longo prazo têm horizonte de 30 anos. Tais estudos contemplam em geral apenas projeções de demanda e planos de geração. Quanto às linhas de transmissão são estabelecidas apenas linhas gerais de desenvolvimento do sistema elétrico e em um alto nível, como a interligações entre regiões. Cita-se como exemplo, as linhas do SIN para a interligação da Usina Hidrelétrica de Belo Monte, a partir da subestação seccionadora Xingu com as regiões Sudeste/Centro-Oeste e Nordeste.

Estudos com horizontes de planejamento superiores a esses não costumam ser realizados. Os estudos com horizonte de planejamento inferior a cinco anos não contemplam, em geral, a construção de novos componentes do sistema, não sendo, então, um planejamento de expansão, mas um planejamento de operação.

Dentro deste cenário, o presente trabalho visa o desenvolvimento de uma ferramenta aplicável a problemas típicos da EPE, em estudos tipicamente de curto e de médio prazo, que tratam da expansão dos sistemas de transmissão.

### **3. ANÁLISE DE ALTERNATIVAS**

O problema do planejamento da expansão de um sistema de transmissão elétrica consiste em determinar as linhas de transmissão e os transformadores a serem instalados, de forma a minimizar os custos de operação e investimento. Este problema complexo pode ser decomposto em duas partes. Neste caso a primeira é a responsável pelo investimento e a segunda pela operação (Romero e Monticelli, 1994).

A parte referente ao investimento pode realizar a otimização do problema. Três tipos de algoritmos têm sido propostos para resolver o problema da otimização: métodos matemáticos, métodos heurísticos e métodos metaheurísticos (Moghaddam, et alii, 2011).

A parte referente à operação realiza o despacho econômico do sistema, sujeito à capacidade do investimento determinado pela primeira parte do problema completo. Este despacho de carga pode ser feito pelos métodos de transportes, métodos CC, métodos AC ou métodos híbridos. A formulação do problema de operação para os métodos de transportes, CC e híbridos pode ser vista em (Flores, 2006). A formulação para o método AC encontra-se em (Rider, et alii, 2007).

O problema pode ser classificado como estático ou dinâmico. Esta classificação refere-se ao período de avaliação. A avaliação em um estágio configura um problema estático. A utilização de mais estágios leva a um problema dinâmico (Romero e Monticelli, 1994).

A análise e a escolha das alternativas na formulação do problema e na elaboração do método são mostradas a seguir.

#### **3.1. PERÍODO DE AVALIAÇÃO.**

O problema da expansão pode ser dividido em períodos de investimento. Quanto maior o número de períodos inseridos no problema, mais detalhado este fica, fazendo com que sua solução ótima seja mais econômica.

Escolhe-se formular um problema de um estágio, visando uma simplificação do mesmo. Essa simplificação evita o aumento do número de combinações possíveis decorrente do aumento de estágios. Na solução em apenas um estágio, não há considerações sobre o momento da instalação, uma vez que esse é justamente o início da janela temporal considerada para tal estágio. Tal simplificação é desejável por se tratar de um desenvolvimento inicial do método proposto. Uma estratégia para resolver o problema dinâmico pode ser a utilização de uma sequência de problemas estáticos (Vinasco, et alli, 2011).

### **3.2. TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO.**

Os algoritmos metaheurísticos podem ser utilizados na otimização do problema de investimento. As técnicas de otimização que utilizam este tipo de algoritmo são: busca tabu, algoritmos genéticos, nuvem de partículas, inteligência de enxames, etc.

O algoritmo genético foi utilizado na solução do problema da expansão em (Rudnick, et alli, 1996; Romero, et alli, 2007; Murthy, et alli, 2008; Gallego, et alli, 2009). A nuvem de partículas foi utilizada em (Kavitha e Swarup, 2006; Verma, et alli, 2009). Um sistema híbrido de busca tabu e otimização ordinária é realizado em (Mori e Iimura, 2007).

Alguns algoritmos metaheurísticos de inteligência de enxames foram comparados entre si em (Serapião, 2009; Augustus, 2009). Neles é destacado o resultado obtido com o algoritmo das abelhas.

O algoritmo das abelhas é aplicado ao problema de otimização da alocação de dispositivos FACTS em (Idris, et alli, 2009). O método desenvolvido demonstrou robustez e flexibilidade de parâmetros.

Tais fatores sugerem o potencial emprego do algoritmo das abelhas para modelar o problema de expansão do sistema de transmissão de energia elétrica.

### **3.3. AVALIAÇÃO DAS SOLUÇÕES.**

Para a verificação da qualidade e validade de cada solução propostas é necessário um método de cálculo. O modelo de corrente contínua (CC) é considerado o ideal para a área de planejamento de sistemas de transmissão (Flores, 2006). Por esta razão e também por ser muito descrito pela bibliografia relacionada, o modelo CC é escolhido.

#### 4. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DA EXPANSÃO EM UM ESTÁGIO

O horizonte de planejamento escolhido, de curto ou médio prazo, permite que o problema do planejamento da expansão da transmissão seja formulado separadamente do planejamento da geração.

O planejamento da expansão configura-se em uma função multi-objetivo. Estes objetivos são a minimização do custo de investimento e a minimização do corte de carga. Neste horizonte de planejamento, não é aceitável, em geral, o não atendimento à carga. Desta forma, a função pode ser transformada em uma função com um único objetivo, utilizando um fator ( $\alpha$ ) para compatibilizar o corte de carga ao custo. Este fator deve ser suficientemente grande para que a minimização do custo leve a soluções onde não ocorram corte de carga.

O planejamento da expansão da transmissão considerado é estático. Isto significa que apenas um período de investimento é considerado dentro do horizonte de planejamento. Desta forma a função objetivo é simplificada a apenas uma parcela de investimento, que se refere ao custo de aquisição e instalação dos equipamentos, e uma parcela de operação, que se refere ao custo de não atendimento à carga. O não atendimento à carga pode ser modelado pela injeção de potência no valor do corte de carga a partir de geradores fictícios ligados às barras.

A modelagem matemática da função objetivo é feita utilizando-se o modelo CC, e o problema da expansão da transmissão assume a seguinte forma:

$$\min v = \sum_{ij} c_{ij} \times n_{ij} + \alpha \times \sum_k r_k \quad (1)$$

$$\text{s.a.} \quad \mathbf{S} \times \mathbf{f} + \mathbf{g} + \mathbf{r} = \mathbf{d} \quad (2)$$

$$f_{ij} = \frac{n_{ij} + n_{ij}^0}{x_{ij}} \times (\theta_i - \theta_j) \quad (3)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij} + n_{ij}^0) \times f_{ij}^{max} \quad (4)$$

$$\mathbf{g}^{min} \leq \mathbf{g} \leq \mathbf{g}^{max} \quad (5)$$

$$0 \leq \mathbf{r} \leq \mathbf{d} \quad (6)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq n_{ij}^{max} \quad (7)$$

em que:

$v$  – valor total do custo de expansão e operação para o estágio considerado [\$];

$c_{ij}$  – custo de instalação de uma linha no ramal  $ij$  [\$];

$n_{ij}$  – número de linhas adicionadas ao ramal  $ij$ ;

$\alpha$  – fator para compatibilizar a unidade de custo com corte de carga [\$];

$r_k$  – corte de carga na barra  $k$ ;

$S$  – matriz incidência nó-ramo da rede inicial e dos ramos candidatos;

$f$  – vetor de fluxo de potência ativa nos ramos [ $pu$ ];

$g$  – vetor das injeções de potência ativa dos geradores reais [ $pu$ ];

$r$  – vetor das injeções de potência ativa dos geradores fictícios (corte de carga) [ $pu$ ];

$d$  – vetor das demandas de potência ativa [ $pu$ ];

$f_{ij}$  – fluxo de potência ativa no ramo  $ij$  [ $pu$ ];

$x_{ij}$  – reatância de uma linha no ramal  $ij$  [ $pu$ ];

$n_{ij}^0$  – número de linhas existentes no ramal  $ij$  na rede inicial;

$\theta_i$  – ângulo de fase da tensão na barra  $i$ ;

$\theta_j$  – ângulo de fase da tensão na barra  $j$ ;

$f_{ij}^{max}$  – fluxo máximo de potência ativa em uma linha do ramal  $ij$  [ $pu$ ];

$g^{min}$  – vetor das injeções de potência ativa mínima dos geradores reais [ $pu$ ];

$g^{max}$  – vetor das injeções de potência ativa máxima dos geradores reais [ $pu$ ] e

$n_{ij}^{max}$  – número máximo de linhas que podem ser adicionadas ao ramal  $ij$ .

Esta formulação resulta em um problema não linear inteiro misto (PNLIM). A função objetivo pode ser dividida em duas, uma para o custo de investimento e outra para o custo de operação. Esta divisão é mostrada no diagrama da Figura 1.

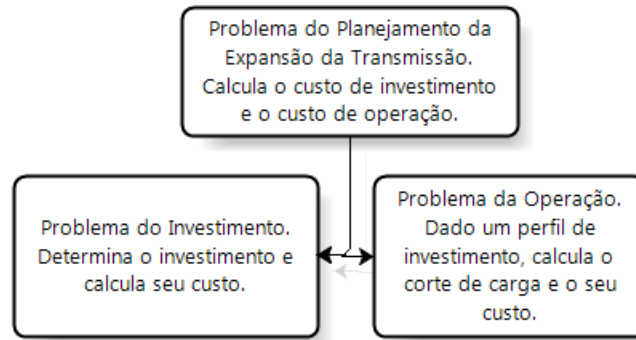


Figura 1. Divisão do problema.

O problema de investimento então determina o perfil de investimento  $n_{ij}$ . A partir deste perfil de investimento o problema da operação calcula o corte de carga. Os custos de cada parcela são então calculados como no problema geral da expansão (1).

A determinação do perfil de investimento é feita de forma arbitrária. A partir do custo total relacionado a um perfil, ocorre a determinação de novos perfis, em um processo iterativo. O problema de investimento então busca encontrar o perfil que leve a um menor custo total, baseando-se em perfis de custo calculados anteriormente.

O problema de operação é um problema de despacho para minimizar o corte de carga sujeito à capacidade das linhas. Uma vez que o perfil de investimento  $n_{ij}$  é definido, este é um problema linear.

Os problemas de investimento e de operação são formulados separadamente nas próximas seções.

#### 4.1. O PROBLEMA DE INVESTIMENTO

O método proposto para solução do problema da expansão de sistemas elétricos requer uma busca por soluções  $n_{ij}$ . Em sistemas de pequeno porte, com até quatro barras (SE), todo o universo de soluções pode ser analisado em alguns minutos com as ferramentas atuais. Porém em sistemas mais complexos, de médio (5 a 20 barras) ou grande porte (mais de 20



barras), o número de soluções cresce rapidamente, o que pode dificultar a análise de cada uma delas.

Dois exemplos que demonstram tal aumento do número de soluções são apresentados a seguir. Primeiramente é mostrado o número de soluções em um sistema de pequeno porte. Em seguida pode ser verificado o rápido aumento do número de soluções em um sistema com somente duas barras a mais, mas já este um sistema de médio porte.

- **EXEMPLO: PEQUENO SISTEMA ELÉTRICO (QUATRO BARRAS)**

O número de ramais em um sistema de transmissão onde todas as barras podem ser interligadas pode ser calculado por:

$$R = C(B, 2) = \frac{B!}{(B-2)! \times 2!} \quad (8)$$

onde R é o número de ramais, B o número de barras e  $C(B, 2)$  representa a operação de análise combinatória conhecida como combinação.

Dessa forma o número de ramais neste exemplo de sistema é seis ( $R = 4 \times 3 \times 2 \times 1 / (2 \times 1) \times 2 \times 1 = 6$ ).

Considerando então um caso em que exista uma linha em cada ramal, permitindo-se construir até mais nove linhas em cada um deles, tem-se que o número de soluções (perfis de investimento) é  $10^6 = 1.000.000$ .

Este número de soluções é grande, mas é possível investigar o custo de cada uma delas dado o horizonte de planejamento.

A Tabela 1 exemplifica três desses possíveis perfis (soluções), onde cada um é dado pelo número de LT em cada ramal.

Tabela 1 – Exemplos de Solução.

Ramal	1-2	1-3	1-4	2-3	2-4	3-4
Perfil 1	10	3	3	8	7	5
Perfil 2	2	5	7	8	6	2
Perfil 3	10	8	4	3	1	9

• **EXEMPLO: SISTEMA ELÉTRICO DE MÉDIO PORTE (SEIS BARRAS)**

Com o cálculo combinatorial, percebe-se que este sistema apresenta quinze ramais. Com as mesmas considerações do exemplo anterior, tem-se que o número de soluções para este sistema é  $10^{15} = 1.000.000.000.000.000$ .

A quantidade de soluções aqui é muito superior à do exemplo anterior. A análise de grandes quantidades de soluções em sistemas mais complexos pode se tornar inviável dentro do horizonte de planejamento.

Este rápido aumento do número de soluções torna desejável a utilização de um método que oriente a busca por melhores soluções, sem ter de analisar para isso cada uma delas. Tais métodos de busca orientada costumam se basear em soluções já analisadas, e a partir delas propor novas soluções, resultando num processo iterativo. Este processo iterativo é apresentado na Figura 2.

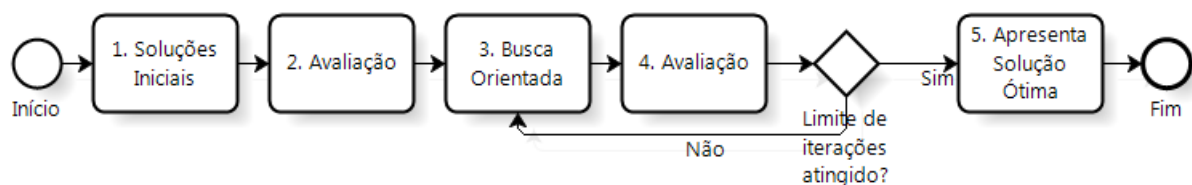


Figura 2. Fluxograma da busca por melhores soluções.

Uma vez que a busca iterativa visa encontrar a solução de menor custo, e com isso o perfil de investimento ótimo, o problema de investimento configura-se em um problema de otimização.

Um exemplo de método otimização com busca orientada, que é muito utilizada atualmente, é o algoritmo genético. Nos algoritmos genéticos, a busca iterativa por soluções melhores é feita realizando-se uma recombinação das melhores soluções encontradas num momento anterior. Este tipo de método recebe seu nome devido à semelhança com a evolução genética de populações.

Há ainda diversos outros métodos de busca que podem ser utilizados e estão descritos na bibliografia consultada. Recentemente a maioria dos métodos pesquisados são metaheurísticos. Tais métodos são baseados em avaliações empíricas dos resultados. Podem ser citados, além dos Algoritmos Genéticos, métodos como a Busca Tabu, as Nuvens de Partículas e algoritmos baseados em inteligência de enxames.

O tipo de busca orientada escolhido para a realização do presente trabalho recebe seu nome devido à semelhança do comportamento de busca por alimento das abelhas. Nos métodos de inteligência de abelhas, novas soluções são procuradas na vizinhança das melhores soluções. A quantidade de soluções buscadas no entorno de cada solução varia de acordo com a qualidade dela. As piores soluções são abandonadas e buscas aleatórias também são realizadas a cada iteração. A presença das buscas aleatórias diminui a probabilidade da solução do problema não convergir para um valor ótimo global, encontrando somente valores de ótimos locais.

Portanto há diversos parâmetros que podem ser alterados nos métodos de inteligência de enxames. O ajuste dos parâmetros pode ser feito para adequar o método ao problema que se deseja resolver.

Os parâmetros que podem ser alterados são:

- universo de busca;
- número de soluções iniciais (aleatórias);
- quantidade de soluções que tem sua vizinhança procurada;
- quantidade de buscas em cada vizinhança;
- raio da vizinhança e
- critério de parada das iterações.

Estes parâmetros devem ser ajustados para conferir robustez e desempenho ao método.

Os ajustes podem ser feitos com a aplicação em sistemas de resposta conhecida, mediante observação da evolução das soluções encontradas a cada iteração.

#### 4.2. O PROBLEMA DE OPERAÇÃO

A função objetivo do problema de operação é a minimização do custo do corte de carga. A modelagem matemática da função objetivo é feita utilizando-se o modelo CC, e o problema da operação assume a seguinte forma:

$$\min v = \alpha \times \sum_k r_k \quad (9)$$

$$\text{s.a.} \quad \mathbf{S} \times \mathbf{f} + \mathbf{g} + \mathbf{r} = \mathbf{d} \quad (10)$$

$$f_{ij} = \frac{n_{ij} + n_{ij}^0}{x_{ij}} \times (\theta_i - \theta_j) \quad (11)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij} + n_{ij}^0) \times f_{ij}^{max} \quad (12)$$

$$\mathbf{g}^{min} \leq \mathbf{g} \leq \mathbf{g}^{max} \quad (13)$$

$$0 \leq \mathbf{r} \leq \mathbf{d} \quad (14)$$

em que:

$v$  – valor total do custo de expansão e operação para o estágio considerado [\$];

$n_{ij}$  – número de linhas adicionadas ao ramal  $ij$ ;

$\alpha$  – fator para compatibilizar a unidade de custo com corte de carga [\$];

$r_k$  – corte de carga na barra  $k$ ;

$\mathbf{S}$  – matriz incidência nó-ramo da rede inicial e dos ramos candidatos;

$\mathbf{f}$  – vetor de fluxo de potência ativa nos ramos [ $pu$ ];

$\mathbf{g}$  – vetor das injeções de potência ativa dos geradores reais [ $pu$ ];

$\mathbf{r}$  – vetor das injeções de potência ativa dos geradores fictícios (corte de carga) [ $pu$ ];

$\mathbf{d}$  – vetor das demandas de potência ativa [ $pu$ ];

$f_{ij}$  – fluxo de potência ativa no ramo  $ij$  [ $pu$ ];

$x_{ij}$  – reatância de uma linha no ramal  $ij$  [ $pu$ ];

$n_{ij}^0$  – número de linhas existentes no ramal  $ij$  na rede inicial;

$\theta_i$  – ângulo de fase da tensão na barra  $i$ ;

$\theta_j$  – ângulo de fase da tensão na barra  $j$ ;

$f_{ij}^{max}$  – fluxo máximo de potência ativa em uma linha do ramal  $ij$  [ $pu$ ];

$\mathbf{g}^{min}$  – vetor das injeções de potência ativa mínima dos geradores reais [ $pu$ ];

$\mathbf{g}^{max}$  – vetor das injeções de potência ativa máxima dos geradores reais [ $pu$ ] e

Observar que as restrições do tipo:

$$f_{ij} = \frac{n_{ij} + n_{ij}^0}{x_{ij}} \times (\theta_i - \theta_j) \quad (15)$$

só fazem sentido para  $ij$  caso  $n_{ij} + n_{ij}^0 > 0$ . Caso  $n_{ij} + n_{ij}^0 = 0$ , tais restrições não existem.

Após a formulação dos problemas de investimento e operação separadamente, o custo total pode ser determinado somando o custo de investimento com o custo de operação, como é mostrado:

$$v = \sum_{ij} c_{ij} \times n_{ij} + \alpha \times \sum_k r_k \quad (16)$$

Os métodos de solução desenvolvidos para os problemas formulados são apresentados na próxima seção.

## 5. MÉTODO DE SOLUÇÃO DESENVOLVIDO

### 5.1. MÉTODO DE BUSCA PARA O PROBLEMA DE INVESTIMENTO

#### 5.1.1. ALGORITMO DAS ABELHAS

O método de busca, chamado também de otimização, foi feito a partir de um algoritmo de inteligência de abelhas (Cardiff University, 2011).

Inicialmente o algoritmo escolhido foi adaptado para o caso da expansão do sistema de transmissão elétrica. Tal algoritmo é mostrado e explicado a seguir e uma ilustração dele pode ser vista no Anexo 7:

Início.

1. Inicializa-se a população com soluções aleatórias (Figura 53).

Estas soluções são um perfil de investimento, ou seja, quantas linhas devem ser construídas em cada ramal. Desta forma, cada solução apresenta um número de variáveis igual à quantidade de ramais, formando uma matriz com dimensões *número de soluções X número de ramais*. O número de soluções é um parâmetro do método e pode ser ajustado para melhor se adaptar ao problema que se deseja resolver.

2. Avalia-se a qualidade destas soluções (Figura 54).

Início do laço.

3. Os resultados são ordenados de acordo com suas qualidades (Figura 54).

O ordenamento coloca as soluções em ordem crescente de custos, o que torna o método de otimização um caso de minimização. No algoritmo original é feito uma busca pela melhor qualidade (melhor pólen, no caso das abelhas), então o algoritmo de otimização utilizado como fonte busca a maximização das soluções. Esta diferença é notada em todas as escolhas do método pela melhor solução.

4. Inicia-se uma busca aleatória na vizinhança dos melhores resultados (Figura 55).

Esta busca utiliza três parâmetros do método: o número de melhores resultados, o número de buscas aleatórias em cada um dos melhores resultados e o raio de busca na vizinhança desses resultados. Tais parâmetros são ajustados após a aplicação do método, buscando por vezes deixá-lo mais robusto ou mais rápido.

5. A melhor solução de cada vizinhança pesquisada é escolhida e as outras são descartadas (Figura 56).
6. As piores soluções são descartadas e um número igual de soluções é gerado aleatoriamente (Figura 56).

Fim do laço.

O critério de parada do laço é um número pré-determinado de iterações. A Figura 58 mostra algumas buscas deste processo iterativo até a chegada à melhor fonte.

7. As melhores soluções (perfis de investimento) encontradas são apresentadas.

Escolheu-se apresentar as melhores soluções ao final de cada laço, para melhor visualização da convergência do método.

Fim.

Um fluxograma deste algoritmo base é mostrado na Figura 3.

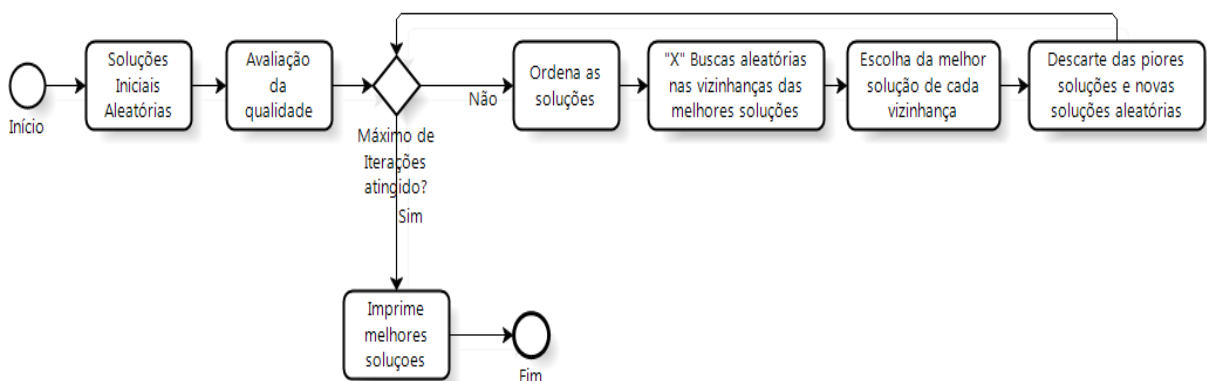


Figura 3. Fluxograma do algoritmo de abelhas base.

### 5.1.2. AJUSTES DOS PARÂMETROS

Após a implementação do algoritmo básico, os parâmetros da busca foram ajustados empiricamente. Ideias gerais, adquiridas com este processo, podem ser utilizadas em um segundo momento para propor melhorias ao método.

São apresentados abaixo os dois princípios de ajuste dos parâmetros, para facilitar a compreensão das buscas em geral e também das melhorias futuras:

1. Grau de aleatoriedade das buscas:

Quanto maior a quantidade de buscas aleatórias no universo de soluções, melhores são as chances de o método encontrar a solução ótima global. Em contra partida, uma grande aleatoriedade de buscas pode levar à lentidão do método.

Esta aleatoriedade encontra-se presente em dois parâmetros do método. São eles:

- i. Quantidade de soluções que são abandonadas a cada iteração.

Tipicamente é sugerido o abandono de metade das soluções encontradas em cada iteração. Este número é relativamente grande para o caso do problema da expansão, uma vez que soluções aleatórias dificilmente encontram uma melhor qualidade do que aquelas soluções de vizinhanças que já foram investigadas ao menos 5 vezes. O que torna improdutiva quase a totalidade das buscas aleatórias após a quinta iteração.

Recomenda-se, então, o uso de um número inferior de buscas aleatórias, mas com cautela. Uma possibilidade interessante é realizar a quantidade típica de buscas aleatórias até a quinta iteração. E após isto reduzir progressivamente o número de buscas aleatórias, podendo até mesmo extingui-la após cerca de cem iterações.



ii. Raio de busca.

Seguindo a mesma linha de raciocínio, um raio maior de busca aumenta as possibilidades de buscas no entorno das soluções, ou seja, o método se apresenta com maior aleatoriedade do que quando ajustado com um raio menor, e com isso evitam-se as soluções ótimas locais.

Deve-se ter em mente o ônus da utilização de raios maiores, que é a redução da velocidade de convergência para o valor ótimo. Este fenômeno é amplificado devido ao fato que as buscas nas vizinhanças das melhores soluções encontradas representam quase a totalidade (90 a 95%) das buscas feitas pelo método.

O uso do menor raio de busca, com valor de 1 circuito de transmissão, levou à convergência para ótimos locais. Deve por isso ser evitado. Recomenda-se a utilização do raio de busca de tamanho 2 ou 3. Uma ideia para se ter um bom híbrido de velocidade e robustez no método é a utilização de uma busca com raio 3 a cada dez buscas com raio 2.

2. Intensidade de busca nas vizinhanças das melhores soluções:

O número de buscas em cada região deve ser analisado cuidadosamente de acordo com o problema de expansão apresentado. Como somente uma solução de cada região é escolhida por iteração do método, o aumento de buscas pode levar a um aumento das buscas improdutivas. Este aumento é crítico, pois as buscas nas vizinhanças representam quase a totalidade das buscas feitas pelo método.

Esta intensidade é dada por dois parâmetros do método. São eles:

- i. Número de busca nas vizinhanças das melhores soluções
- ii. Número de busca nas vizinhanças das soluções boas (inferiores às melhores)

Sugere-se tipicamente a realização de 10 a 50 buscas no entorno de cada um dos grupos de vizinhanças citados. O número de buscas no entorno das melhores soluções deve ser aproximadamente o dobro daquelas no entorno das soluções boas.

Uma interessante abordagem para tornar mais dinâmica a busca nas vizinhanças é realizar a escolha por uma solução melhor no momento em que ela é encontrada, centralizando nesta nova solução o raio de buscas. Assim, em uma só iteração, as buscas na vizinhança de uma solução podem obter uma evolução relativamente grande, podendo-se até obter soluções melhores que nem estariam presentes na região de busca inicial.

### 5.1.3. CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Ao iniciar a busca por uma melhor configuração do método, depara-se com a necessidade de comparar o desempenho dele nas diferentes configurações. Para isto foram criados alguns critérios de avaliação do método. Estes critérios visam a análise da convergência e da velocidade do método.

- Convergência:

A análise da convergência é feita com base no progresso do método, iteração a iteração. São calculados para isso: o valor do menor custo (melhor solução) de cada iteração, a média dos custos, o valor do maior custo (pior solução) e o valor do desvio padrão das soluções.

Tais valores são então colocados em um único gráfico, para facilitar o entendimento e a comparação com os gráficos obtidos na análise de outras configurações e/ou melhorias. Cita-se que no cálculo dos valores médios, de desvio padrão e da pior solução em cada iteração foram consideradas apenas as melhores e as boas soluções. As piores soluções, por serem em geral originadas de buscas aleatórias, se utilizadas no cálculo desses critérios, gerariam um ruído que prejudicaria a posterior análise.

- Velocidade:

A velocidade do método é avaliada por alguns cronômetros. Estes cronômetros vão medir o tempo, em segundos, de cada iteração e também da execução completa do método.

É importante salientar que os valores obtidos com este critério só são válidos para comparação dentro de uma mesma plataforma e sob as mesmas condições. Isso porque a execução do método em uma plataforma mais poderosa naturalmente seria mais veloz do que em plataformas inferiores.

#### 5.1.4. MELHORIAS DO ALGORITMO BASE DAS ABELHAS

##### 5.1.4.1. BUSCA DINÂMICA

No algoritmo base uma nova solução só é escolhida após um ciclo completo de buscas em sua vizinhança. É necessário neste caso armazenar todas as soluções de uma região, para então compará-las.

A mudança consiste em comparar apenas uma nova solução escolhida com a anterior, descartando aquela de pior qualidade, e recentralizando o raio de busca na melhor delas. Somente após esta comparação uma nova solução da vizinhança é escolhida.

Esta alteração diminuiu o tempo das iterações e aumentou a velocidade de convergência do método. Por isto chamou-se esta configuração de busca dinâmica. Esta alteração no algoritmo pode ser visualizada no fluxograma da Figura 4.

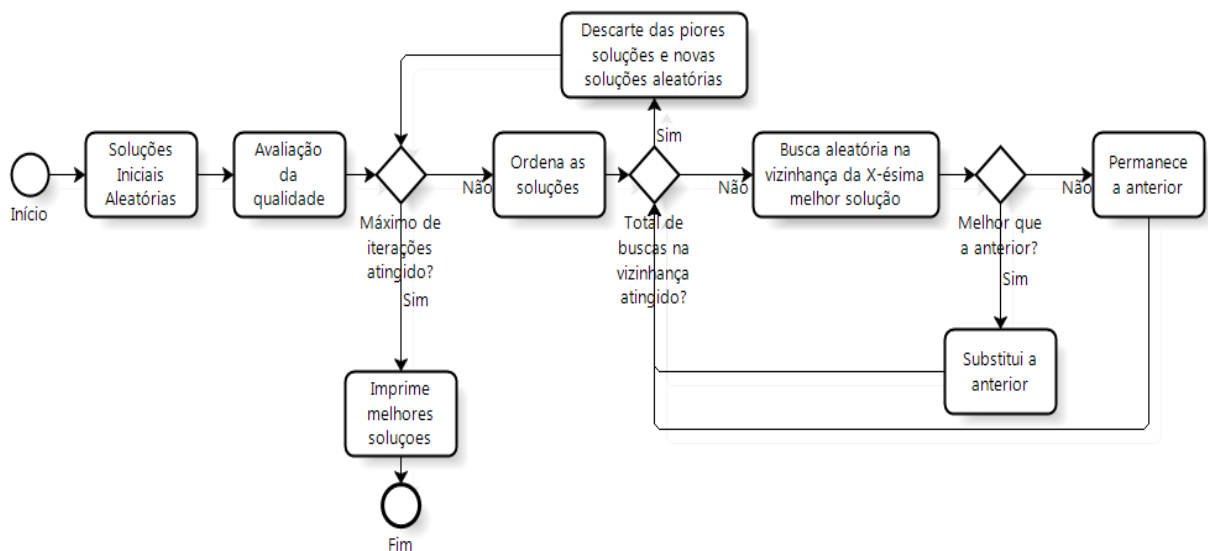


Figura 4. Fluxograma do algoritmo das abelhas com busca dinâmica.

#### **5.1.4.2. INTERRUPÇÃO DAS BUSCAS ALEATÓRIAS**

Ao realizar a aplicação do método como algoritmo base, verifica-se que, após certo número de iteração, as soluções aleatórias muito dificilmente levam a soluções melhores do que as melhores soluções já encontradas naquele momento. Para evitar então o desperdício quase certo dessas buscas, escolhe-se interrompê-las.

Estas buscas são trocadas por buscas nas vizinhanças das melhores soluções conhecidas. Esta busca, ao contrário daquelas já realizadas dentro de tais regiões, é feita com um raio com o dobro do tamanho.

A importância deste tratamento é garantir robustez ao método. Lembra-se que as soluções aleatórias são a ferramenta para se evitar a convergência do método para valores de ótimo locais. O abandono deste tipo de pesquisa por soluções é então feito aumentando-se a área de busca dentro de uma região, e com isso sua aleatoriedade.

#### **5.1.4.3. BUSCAS ALEATÓRIAS COM PROBABILIDADES**

O conhecimento de uma solução aproximada pode ser utilizado para melhorar o desempenho do método. Isto é feito com o uso de buscas aleatórias com diferentes probabilidades. Por exemplo, em um sistema onde se sabe que a maioria dos ramais tende a não ser ocupada por circuitos, é interessante aumentar a probabilidade, e com isso a quantidade, de zeros na geração da solução aleatória.

Este tipo de busca pode ser usado para as soluções aleatórias iniciais, para as soluções aleatórias ao longo do método ou para os dois casos.

#### **5.1.4.4. BUSCA LATERALIZADA**

A composição do custo das soluções coloca grandes penalidades para situações de corte de carga. Devido a este fato, soluções que se encontram geograficamente próximas à

solução ótima, mas apresentam déficit de circuitos, recebem um valor muito alto de custo. Assim, tais soluções são descartadas.

Este fato faz com que as melhores soluções de uma determinada iteração apresentem circuitos excedentes. Então a aproximação a soluções melhores geralmente ocorre com uma redução do número de circuitos. Ou seja, próximo a um valor de ótimo (mínimo custo), seja local ou global, há diversas subidas muito rápidas, que se assemelham a singularidades.

Tendo em vista essa característica intrínseca à formulação do problema da expansão, o método pode ser modificado para procurar melhores soluções preferencialmente em regiões com menor número de circuitos. Isto pode ser feito modificando o raio de busca na vizinhança das melhores soluções conhecidas, deixando-o menor para um aumento do número de circuitos (LT) e maior para uma redução deste número. Este mecanismo é chamado de busca lateralizada.

## **5.2. MÉTODO DE DESPACHO – MODELO CC**

O modelo CC realiza o despacho de cargas no sistema de transmissão, minimizando o corte de carga. Trata-se, portanto, também de um problema de otimização. O modelo de otimização considerado corresponde ao despacho da geração disponível respeitando o limite de capacidade das linhas de configuração base e das adicionadas, bem como gerações fictícias que representam o corte de carga.

O método de despacho escolhido, que se encontra no Anexo 3 e foi desenvolvido em Matlab, é descrito por um modelo linear de otimização, assim caracterizado:

- a) variáveis:
  - i) ângulo de fase das tensões nodais;
  - ii) injeção (geração) de potência nas barras e
  - iii) cortes de carga nas barras.

- b) função objetivo: minimização do corte de carga.
- c) restrições:
  - i) balanço de potência ativa e
  - ii) limites de abertura angular nas linhas/transformadores.
- d) limites nas variáveis:
  - i) limites para ângulos de fase de  $-\pi$  a  $+\pi$ ;
  - ii) limites mínimos e máximos de injeção nas barras e
  - iii) limite de corte de carga nas barras.

As variáveis de entradas são:

- barra inicial das linhas/transformadores;
- barra final das linhas/transformadores;
- número de linhas/transformadores adicionados;
- número de linhas/transformadores na configuração inicial;
- número máximo de linhas/transformadores que pode ser instalado;
- reatância das linhas/transformadores;
- fluxo máximo de potência ativa nas linhas/transformadores;
- valor mínimo de geração;
- valor máximo de geração e
- vetor com a demanda em cada barra.

As variáveis de saída são:

- valores ótimos das variáveis do problema:
  - ângulo de fase das tensões nodais;
  - injeção (geração) de potência nas barras e
  - cortes de carga nas barras.
- valor da função objetivo: custo do sistema.

O equacionamento é feito a partir da 1ª Lei de Kirchhof (Lei dos Nós) e dos limites de abertura angular. Estes limites dependem da existência de linhas, da reatância e da capacidade de cada circuito (linhas de transmissão mais transformadores) adicionado.

Este método de despacho encontra-se escrito em Matlab, com uma linguagem também utilizada por outros programas de cálculo numérico como Octave, Scilab, Rlab e SciPy. A função *linprog*, presente nos programas Matlab, Octave e Scilab (*linpro* neste último) realiza o cálculo de otimização dado pelas equações e inequações descritas acima.

Detalhes para o cálculo de despacho utilizado podem ser observados na ajuda dos programas citados que possuem a função *linprog*, e no Anexo 3.

## 6. ESTUDOS DE CASO

Estudos de caso foram realizados para poder comparar os comportamentos das diferentes configurações e melhorias realizadas. O problema escolhido para a aplicação do método é o Sistema de Garver, que é frequentemente utilizado pela bibliografia relacionada e tem solução conhecida. O diagrama unifilar deste sistema pode ser visto na Figura 52. Detalhes e explicações podem ser vistos no Anexo 5. Após estes estudos espera-se compreender as diferenças entre cada configuração, podendo-se então optar por aquela com características mais favoráveis à solução de qualquer problema que se apresente.

Cita-se ainda que os estudos de caso foram feitos em um computador com as seguintes características:

- Processador: Intel Dual - Core, 1,2GHz;
- Memória: 2 GB;
- Sistema Operacional: Windows 7 (32 bits) e
- Software: Matlab (versão 2008).

### 6.1. SISTEMA DE GARVER (SEM REDESPACHO) – MÉTODO BASE

A solução ótima deste problema de Garver tem custo 200 e o perfil da Tabela 2.

**Tabela 2 - Solução de Garver sem Redespacho.**

Ramais:	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	2-3	2-4	2-5	2-6	3-4	3-5	3-6	4-5	4-6	5-6
Nº LT:	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	1	0	0	2	0

O método foi executado com 200 iterações, em um tempo total de 12913 segundos (aproximadamente 215 minutos), uma média de 65 segundos por iteração. O resultado ótimo foi encontrado na 139ª iteração.

Somente para este primeiro estudo de caso, foi colocada a solução inicial entre as soluções ótimas, para uma visualização inicial dos caminhos pelos quais as melhores soluções



se aproximam da solução ótima. As Figuras de 5 a 12 mostram a evolução das melhores soluções encontradas em suas respectivas iterações.

Soluções - 5 melhores perfis de investimento

---

Iteração: 0

Barras		Perfis (Número de LTs novas)				
Início	Fim	1º	2º	3º	4º	5º
1	2	0	0	0	5	0
1	3	0	7	0	5	1
1	4	0	2	1	0	1
1	5	0	1	3	8	3
1	6	0	4	5	1	4
2	3	0	3	7	1	5
2	4	0	6	1	4	0
2	5	0	2	3	6	0
2	6	4	0	5	0	0
3	4	0	0	1	3	10
3	5	1	1	8	1	0
3	6	0	5	6	0	3
4	5	0	2	1	7	5
4	6	2	2	0	9	3
5	6	0	5	6	0	6

Custo de investimento					
1º	2º	3º	4º	5º	
1.0e+003 *					
0.2000	1.7910	1.8190	1.8920	2.0350	

Figura 5. Soluções iniciais

Iteração: 1

Barras		Perfis (Número de LTs novas)				
Início	Fim	1º	2º	3º	4º	5º
1	2	0	2	0	0	0
1	3	0	1	0	6	0
1	4	0	0	0	0	0
1	5	0	3	1	1	0
1	6	0	0	1	0	0
2	3	0	2	2	1	8
2	4	0	0	0	2	0
2	5	0	2	1	1	0
2	6	4	4	4	2	4
3	4	0	0	0	0	0
3	5	1	0	9	0	3
3	6	0	1	0	1	0
4	5	0	0	0	0	1
4	6	2	2	3	2	8
5	6	0	0	1	2	1

Custo de investimento					
1º	2º	3º	4º	5º	
200.0000	508.0000	610.0000	669.0000	704.0000	

Figura 6. 1ª Iteração.

Iteração: 2

Barras		Perfis (Número de LTs novas)				
Início	Fim	1º	2º	3º	4º	5º
1	2	0	2	0	0	0
1	3	0	1	0	6	0
1	4	0	0	1	0	0
1	5	0	3	0	1	0
1	6	0	0	0	0	0
2	3	0	2	1	0	2
2	4	0	0	0	2	0
2	5	0	2	0	0	0
2	6	4	4	8	3	3
3	4	0	0	0	0	0
3	5	1	0	3	0	13
3	6	0	1	0	0	2
4	5	0	0	0	0	0
4	6	2	2	5	3	4
5	6	0	0	0	1	0

Custo de investimento					
1º	2º	3º	4º	5º	
200.0000	508.0000	530.0000	569.0000	606.0000	

Figura 7. 2ª Iteração.

Iteração: 3

Barras		Perfis (Número de LTs novas)				
Início	Fim	1º	2º	3º	4º	5º
1	2	0	2	0	0	0
1	3	0	1	1	6	2
1	4	0	0	0	0	0
1	5	0	3	0	1	5
1	6	0	0	0	0	0
2	3	0	2	0	0	2
2	4	0	0	1	2	0
2	5	0	2	0	0	2
2	6	4	4	8	3	3
3	4	0	0	0	0	0
3	5	1	0	3	0	0
3	6	0	1	0	0	0
4	5	0	0	0	0	0
4	6	2	2	5	3	7
5	6	0	0	0	1	0

Custo de investimento					
1º	2º	3º	4º	5º	
200.0000	508.0000	528.0000	569.0000	578.0000	

Figura 8. 3ª Iteração.

Iteração: 4

Barras		Perfis (Número de LTs novas)				
Início	Fim	1º	2º	3º	4º	5º
1	2	0	0	1	0	0
1	3	0	0	0	5	1
1	4	0	1	0	0	0
1	5	0	0	3	1	0
1	6	0	0	1	0	0
2	3	0	0	4	0	0
2	4	0	0	1	1	1
2	5	0	0	0	0	0
2	6	4	4	5	3	8
3	4	0	0	0	0	0
3	5	1	8	2	0	3
3	6	0	0	0	0	0
4	5	0	0	0	1	0
4	6	2	4	0	3	5
5	6	0	0	0	0	0

Custo de investimento					
1º	2º	3º	4º	5º	
200.0000	460.0000	478.0000	493.0000	528.0000	

Figura 9. 4ª Iteração.

Iteração: 138

Barras		Perfis (Número de LTs novas)				
Início	Fim	1º	2º	3º	4º	5º
1	2	0	0	0	0	0
1	3	0	0	0	0	0
1	4	0	0	0	0	0
1	5	0	1	0	0	0
1	6	0	0	0	0	0
2	3	0	0	0	0	0
2	4	0	0	0	0	0
2	5	0	0	0	0	0
2	6	4	4	4	5	5
3	4	0	0	0	0	0
3	5	1	1	1	1	1
3	6	0	0	0	0	0
4	5	0	0	0	0	0
4	6	2	2	3	2	2
5	6	0	0	0	0	0

Custo de investimento					
1º	2º	3º	4º	5º	
200.0000	220.0000	230.0000	230.0000	230.0000	

Figura 10. 138ª Iteração.

-----  
Iteração: 139

Barras		Perfis(Número de LTs novas)				
Início	Fim	1º	2º	3º	4º	5º
1	2	0	0	0	0	0
1	3	0	0	0	0	0
1	4	0	0	0	0	0
1	5	0	0	1	0	0
1	6	0	0	0	0	0
2	3	0	0	0	0	0
2	4	0	0	0	0	0
2	5	0	0	0	0	0
2	6	4	4	4	4	5
3	4	0	0	0	0	0
3	5	1	1	1	1	1
3	6	0	0	0	0	0
4	5	0	0	0	0	0
4	6	2	2	2	3	2
5	6	0	0	0	0	0

Custo de investimento				
1º	2º	3º	4º	5º
200.0000	200.0000	220.0000	230.0000	230.0000

Figura 11. 139ª Iteração.

-----  
Iteração: 200

Barras		Perfis(Número de LTs novas)				
Início	Fim	1º	2º	3º	4º	5º
1	2	0	0	0	0	0
1	3	0	0	0	0	0
1	4	0	0	0	0	0
1	5	0	0	0	1	0
1	6	0	0	0	0	0
2	3	0	0	0	0	0
2	4	0	0	0	0	0
2	5	0	0	0	0	0
2	6	4	4	4	4	4
3	4	0	0	0	0	0
3	5	1	1	1	1	1
3	6	0	0	0	0	0
4	5	0	0	0	0	0
4	6	2	2	2	2	3
5	6	0	0	0	0	0

Custo de investimento				
1º	2º	3º	4º	5º
200	200	200	220	230

Figura 12. 200ª Iteração.

Nas figuras é possível observar a velocidade inicial alta, e como esta velocidade diminui à medida que valores ótimos locais começam a ser encontrados. É mostrado também o momento em que o método encontra a solução ótima, na 139ª iteração. A continuidade da execução do método até a 200ª iteração, mostra que neste momento a solução ótima já havia sido encontrada por dois diferentes caminhos.

## 6.2. SISTEMA DE GARVER (SEM REDESPACHO) – BUSCA DINÂMICA

O método com a utilização da modificação do algoritmo base para dinamizar as buscas dentro das regiões foi aplicado aqui ao mesmo sistema de 6 barras e 15 ramais. Foram executadas 200 iterações, em um tempo total de 7987 segundos (aproximadamente 133 minutos), uma média de 40 segundos por iteração. O resultado ótimo foi encontrado na 38ª iteração.

As Figuras de 13 a 18 ilustram a evolução das soluções com esta configuração do método.

```

-----
Iteração: 0
O tempo desta iteração foi (em segundos): 2.655
{ Barras }|{|Perfis(Número de Novas LTs)}
{Início Fim }|{| 1° 2° 3° 4° 5°}
  1  2  3  6  4  0  9
  1  3  4  4  1  6  1
  1  4  4  0  5  8  2
  1  5  2  5  7  2  3
  1  6  1  4  6  0  0
  2  3  0  5  3  2  4
  2  4  6  5  5  2  5
  2  5  8  0  0  5 10
  2  6  1  2  6  8  8
  3  4  0  7  0  0  4
  3  5  2  2  2  7  1
  3  6  0  5  1  1  4
  4  5  4  1  6  3  5
  4  6  6  4  0  5  1
  5  6  0  0  2  7  1

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° }
1.0e+003 *
1.6100 2.0000 2.0740 2.2170 2.2620
    
```

Figura 13. Soluções iniciais.

```

-----
Iteração: 2
O tempo desta iteração foi (em segundos): 42.259
{ Barras }|{|Perfis(Número de Novas LTs)}
{Início Fim }|{| 1° 2° 3° 4° 5°}
  1  2  0  0  0  2  0
  1  3  0  2  2  0  1
  1  4  0  0  0  1  0
  1  5  0  0  0  0  0
  1  6  0  1  0  0  0
  2  3  4  0  0  2  1
  2  4  0  0  0  3  1
  2  5  2  3  1  0  0
  2  6  3  5  0  6  4
  3  4  1  1  0  0  2
  3  5  0  6  9  1  7
  3  6  0  0  2  0  0
  4  5  0  0  0  1  0
  4  6  6  0  6  2  7
  5  6  1  0  1  1  0

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° }
532.0000 566.0000 624.0000 684.0000 686.0000
    
```

Figura 15. 2ª Iteração.

```

-----
Iteração: 1
O tempo desta iteração foi (em segundos): 35.179
{ Barras }|{|Perfis(Número de Novas LTs)}
{Início Fim }|{| 1° 2° 3° 4° 5°}
  1  2  0  6  0  0  2
  1  3  1  0  0  1  3
  1  4  0  0  1  4  2
  1  5  0  0  2  0  5
  1  6  1  0  0  1  0
  2  3  6  6  2  3  2
  2  4  0  0  3  0  0
  2  5  0  1  7  0  0
  2  6  3  5  3  2  2
  3  4  0  2  0  0  0
  3  5  7  0  4  4  0
  3  6  2  0  1  2  3
  4  5  0  0  1  2  2
  4  6  3  1  2  2  2
  5  6  2  2  0  0  1

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° }
764.0000 811.0000 818.0000 828.0000 905.0000
    
```

Figura 14. 1ª Iteração.

```

-----
Iteração: 37
O tempo desta iteração foi (em segundos): 39.394
{ Barras }|{|Perfis(Número de Novas LTs)}
{Início Fim }|{| 1° 2° 3° 4° 5°}
  1  2  0  0  0  0  0
  1  3  0  0  0  0  1
  1  4  0  0  0  0  0
  1  5  1  0  0  1  0
  1  6  0  0  0  0  0
  2  3  0  0  0  0  0
  2  4  0  0  0  0  0
  2  5  0  0  0  0  0
  2  6  4  3  3  4  3
  3  4  0  0  0  0  0
  3  5  2  1  2  1  1
  3  6  0  1  0  1  0
  4  5  0  0  0  0  0
  4  6  2  3  2  2  2
  5  6  0  0  1  0  1

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° }
240.0000 248.0000 251.0000 268.0000 269.0000
    
```

Figura 16. 37ª Iteração.

```

-----
Iteração: 38
O tempo desta iteração foi (em segundos): 39.055
{ Barras }|{|Perfis(Número de Novas LTs)}
{Início Fim }|{| 1° 2° 3° 4° 5°}
  1  2  0  0  0  0  0
  1  3  0  0  0  0  0
  1  4  0  0  0  0  0
  1  5  0  1  0  0  1
  1  6  0  0  0  0  0
  2  3  0  0  0  0  0
  2  4  0  0  0  0  0
  2  5  0  0  0  0  0
  2  6  4  4  3  3  4
  3  4  0  0  0  0  0
  3  5  1  2  1  2  1
  3  6  0  0  1  0  1
  4  5  0  0  0  0  0
  4  6  2  2  3  2  2
  5  6  0  0  0  1  0

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° }
200.0000 240.0000 248.0000 251.0000 268.0000
-----

```

Figura 17. 38ª Iteração.

```

-----
Iteração: 200
O tempo desta iteração foi (em segundos): 41.152
{ Barras }|{|Perfis(Número de Novas LTs)}
{Início Fim }|{| 1° 2° 3° 4° 5°}
  1  2  0  0  0  0  0
  1  3  0  0  0  0  0
  1  4  0  0  0  0  0
  1  5  0  0  0  0  0
  1  6  0  0  0  0  0
  2  3  0  0  0  0  0
  2  4  0  0  0  0  0
  2  5  0  0  0  0  0
  2  6  4  4  4  5  5
  3  4  0  0  0  0  0
  3  5  1  1  2  1  1
  3  6  0  0  0  0  0
  4  5  0  0  0  0  0
  4  6  2  2  2  2  2
  5  6  0  0  0  0  0

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° }
200.0000 200.0000 220.0000 230.0000 230.0000
-----

```

Figura 18. 200ª Iteração.

Foi notada uma grande diferença tanto na velocidade de convergência (no método base o resultado ótimo foi encontrado na 139ª iteração, enquanto com a busca local dinâmica a busca foi encontrada na 38ª iteração), quanto no tempo de cada iteração (a iteração levou em média 65 segundos com o método base, e apenas 40 segundos a configuração deste estudo de caso. Por este motivo a busca dinâmica segue integrada às configurações de todos os casos que seguem.

Este estudo de caso, assim como todos os seguintes, foi feito com a utilização dos critérios de avaliação de convergência. A Figura 19 mostra o gráfico obtido.

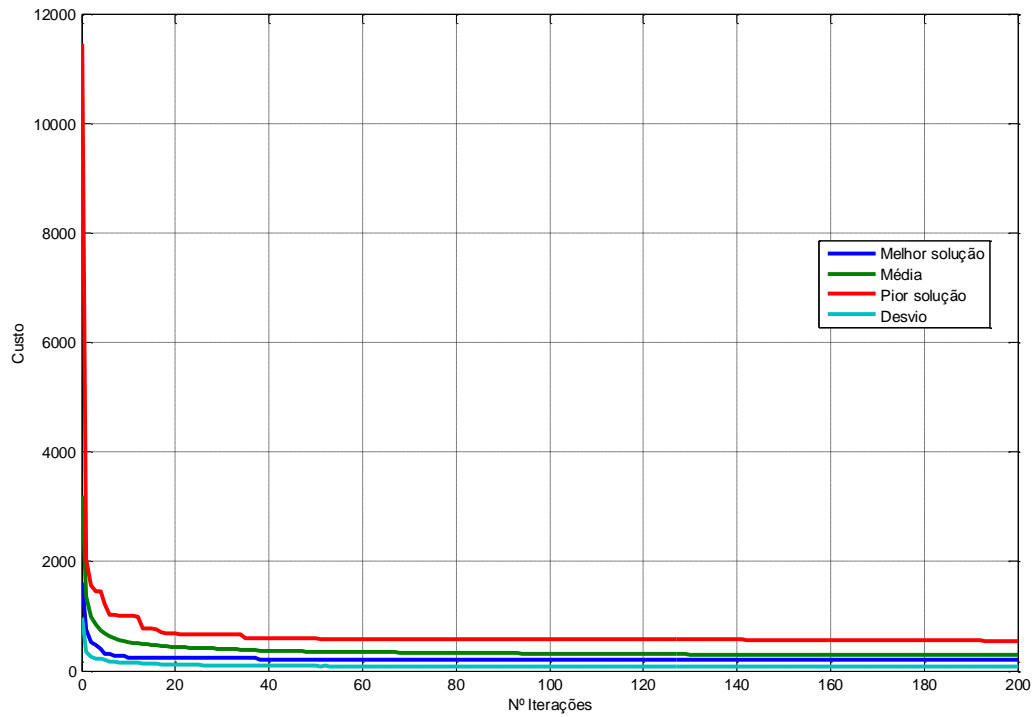


Figura 19. Evolução da convergência.

O alto custo das soluções iniciais gera um problema de escala na visualização do gráfico. As Figuras 20 e 21, a seguir, melhoram a visualização, com um gráfico a partir da 20ª iteração e outro da 10ª à 50ª.

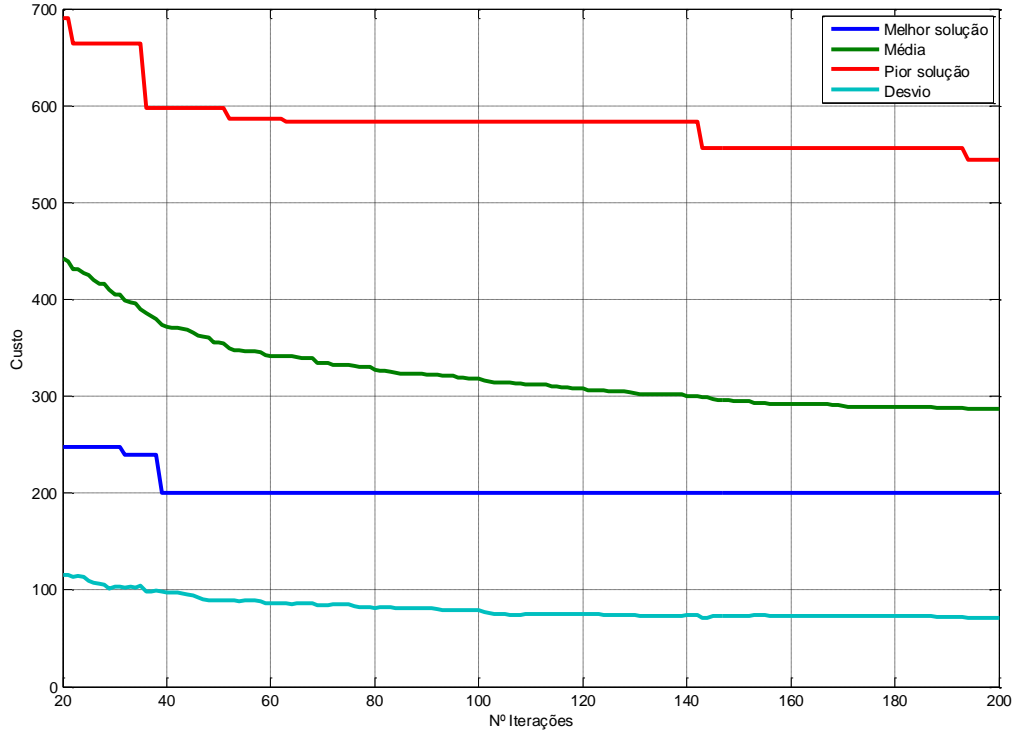


Figura 20. Evolução da convergência – 20ª a 200ª Iteração.

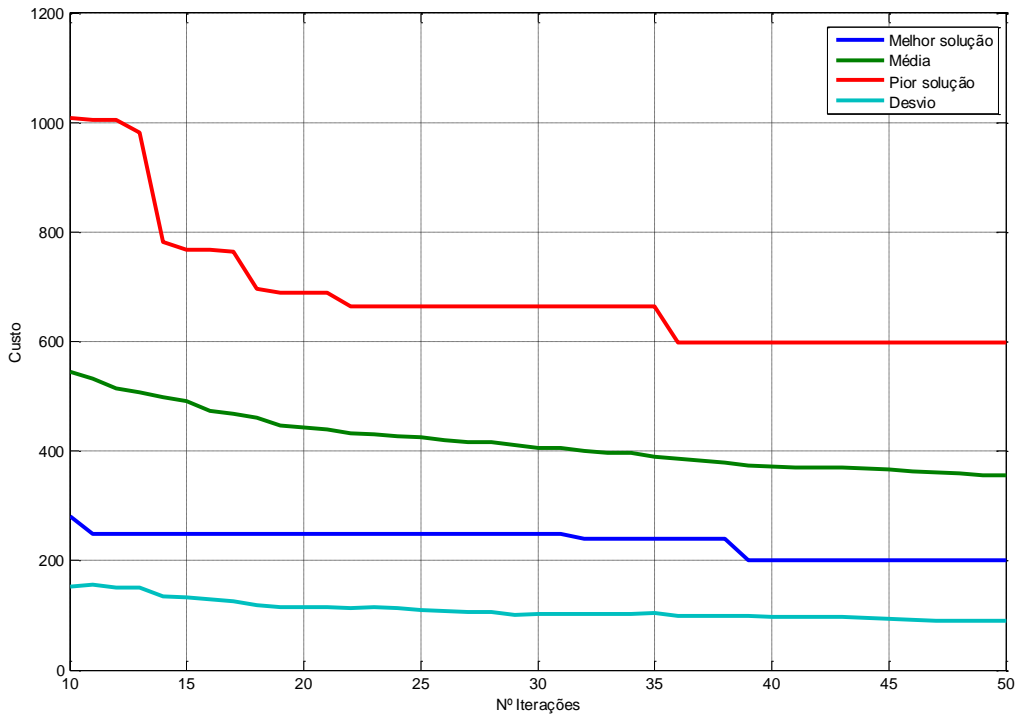


Figura 21. Evolução da convergência – 10ª a 50ª Iteração.

Nestes gráficos é possível observar o comportamento da evolução da convergência por intermédio dos seguintes parâmetros: a evolução da melhor solução encontrada que chega ao valor ótimo na 38ª iteração, a média das soluções, que ao término da execução ainda apresentava evolução significativa; a pior solução, que continuava em uma lenta evolução; e o desvio padrão das soluções, que a partir da 100ª iteração parece ter tido algumas subidas e descidas, oscilando em torno do mesmo valor.

### **6.3. SISTEMA DE GARVER (COM REDESPACHO) – BUSCA DINÂMICA**

Este estudo de caso visa avaliar a capacidade do método em lidar com sistemas em que é possível efetuar um redespacho da energia, ou seja, escolher a quantidade de potência injetada no sistema por cada gerador. Nesta solução com redespacho, a solução ótima tem custo 110 e seu perfil é mostrado na Tabela 3.

**Tabela 3 – Solução de Garver com Redespacho.**

Ramal:	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	2-3	2-4	2-5	2-6	3-4	3-5	3-6	4-5	4-6	5-6
NºLT:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	0

Com a mesma configuração do item anterior, foram executadas 70 iterações, em um tempo total de 2364 segundos (aproximadamente 40 minutos), uma média de 34 segundos por iteração. O resultado ótimo foi encontrado na 39ª iteração.

As Figuras 22 a 27 mostram os melhores resultados em algumas iterações.

```

-----
Iteração: 0
O tempo desta iteração foi (em segundos): 2.467
{ Barras }|{|Perfis(Número de Novas LTs)}
{Início Fim }|{| 1° 2° 3° 4° 5°}
  1  2  0  6  8  1  2
  1  3  1  1  0  6  0
  1  4  5  5  4  1  7
  1  5  3  9  8  1  8
  1  6  0  0  0  2  10
  2  3  5  4  3  3  2
  2  4  2  1  2  4  2
  2  5  2  2  0  3  3
  2  6  1  8  2  1  1
  3  4  8  1  3  1  2
  3  5  5  5  0  4  9
  3  6  0  4  1  8  4
  4  5  0  0  2  7  1
  4  6  6  7  9  0  1
  5  6  0  0  4  2  1

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° }
1.0e+003 *
1.4220 1.7410 1.7850 1.9130 2.2270

```

Figura 22. Solução inicial.

```

-----
Iteração: 2
O tempo desta iteração foi (em segundos): 31.333
{ Barras }|{|Perfis(Número de Novas LTs)}
{Início Fim }|{| 1° 2° 3° 4° 5°}
  1  2  2  1  0  1  2
  1  3  1  1  0  0  0
  1  4  0  2  2  1  0
  1  5  1  2  0  0  2
  1  6  0  0  0  0  0
  2  3  0  4  4  0  0
  2  4  2  1  0  3  0
  2  5  0  0  3  0  0
  2  6  6  3  3  1  4
  3  4  0  0  0  0  3
  3  5  0  1  3  3  8
  3  6  0  0  0  2  0
  4  5  0  0  0  1  0
  4  6  2  1  0  2  0
  5  6  0  0  1  0  0

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° }
458.0000 498.0000 504.0000 529.0000 577.0000

```

Figura 24. 2ª Iteração.

```

-----
Iteração: 1
O tempo desta iteração foi (em segundos): 30.837
{ Barras }|{|Perfis(Número de Novas LTs)}
{Início Fim }|{| 1° 2° 3° 4° 5°}
  1  2  0  0  2  0  7
  1  3  0  1  3  1  1
  1  4  1  0  0  0  0
  1  5  1  0  4  8  4
  1  6  2  0  0  0  0
  2  3  4  0  0  2  1
  2  4  1  0  1  0  1
  2  5  0  9  0  3  0
  2  6  3  2  4  4  4
  3  4  0  2  0  0  0
  3  5  2  3  1  2  12
  3  6  0  0  1  1  0
  4  5  0  0  3  0  0
  4  6  3  2  0  6  0
  5  6  0  0  0  0  0

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° }
556.0000 615.0000 691.0000 719.0000 818.0000

```

Figura 23. 1ª Iteração.

```

-----
Iteração: 38
O tempo desta iteração foi (em segundos): 33.725
{ Barras }|{|Perfis(Número de Novas LTs)}
{Início Fim }|{| 1° 2° 3° 4° 5°}
  1  2  0  0  0  0  0
  1  3  0  0  0  0  0
  1  4  0  0  0  0  0
  1  5  0  0  0  1  0
  1  6  0  0  0  0  0
  2  3  0  1  0  0  0
  2  4  0  0  0  0  0
  2  5  0  0  0  0  1
  2  6  0  1  1  3  1
  3  4  0  0  0  0  0
  3  5  2  2  3  2  2
  3  6  0  0  0  0  0
  4  5  0  0  0  0  0
  4  6  3  2  2  0  2
  5  6  0  0  0  0  0

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° }
130.0000 150.0000 150.0000 150.0000 161.0000

```

Figura 25. 38ª Iteração.



```

-----
Iteração: 39
O tempo desta iteração foi (em segundos): 33.607
{  Barras  }|{Perfis(Número de Novas LTs)}
{Início Fim }|{ 1°  2°  3°  4°  5°}
  1  2    0  0  0  0  0
  1  3    0  0  0  0  0
  1  4    0  0  0  0  0
  1  5    0  0  0  0  1
  1  6    0  0  0  0  0
  2  3    0  0  1  0  0
  2  4    0  0  0  0  0
  2  5    0  0  0  0  0
  2  6    0  0  1  1  3
  3  4    0  0  0  0  0
  3  5    1  2  2  3  2
  3  6    0  0  0  0  0
  4  5    0  0  0  0  0
  4  6    3  3  2  2  0
  5  6    0  0  0  0  0

      Custo de investimento
{  1°    2°    3°    4°    5°  }
110.0000 130.0000 150.0000 150.0000 150.0000
-----

```

Figura 26. 39ª Iteração.

```

-----
Iteração: 70
O tempo desta iteração foi (em segundos): 34.212
{  Barras  }|{Perfis(Número de Novas LTs)}
{Início Fim }|{ 1°  2°  3°  4°  5°}
  1  2    0  0  0  0  0
  1  3    0  0  0  0  0
  1  4    0  0  0  0  0
  1  5    0  0  0  0  0
  1  6    0  0  0  0  0
  2  3    0  1  0  0  0
  2  4    0  0  0  0  0
  2  5    0  0  0  0  0
  2  6    0  1  0  3  2
  3  4    0  0  0  0  0
  3  5    1  1  2  2  1
  3  6    0  0  0  0  0
  4  5    0  0  0  0  0
  4  6    3  2  3  0  2
  5  6    0  0  0  0  0

      Custo de investimento
{  1°    2°    3°    4°    5°  }
110.0000 130.0000 130.0000 130.0000 140.0000
-----

```

Figura 27. 70ª Iteração.

Nas figuras são mostradas as primeiras iterações, o momento em que é encontrada a solução ótima e as soluções na iteração em que se encerrou a execução do método.

O gráfico dos critérios para análise de convergência é mostrado na Figura 28 e com maior detalhe às iterações intermediárias na Figura 29.

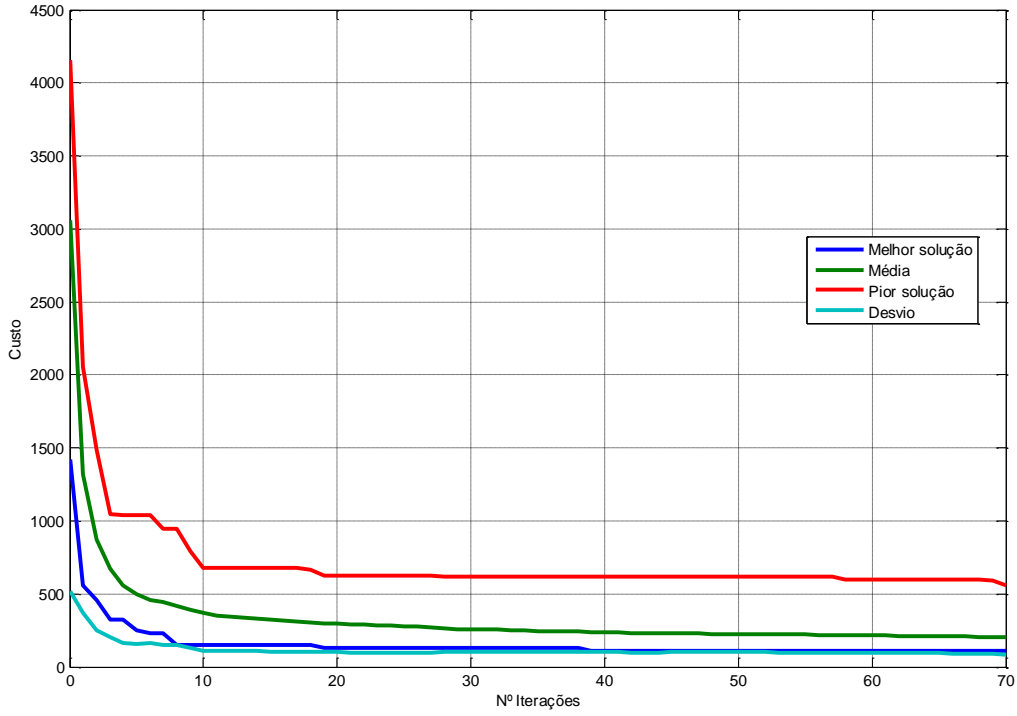


Figura 28. Evolução da convergência.

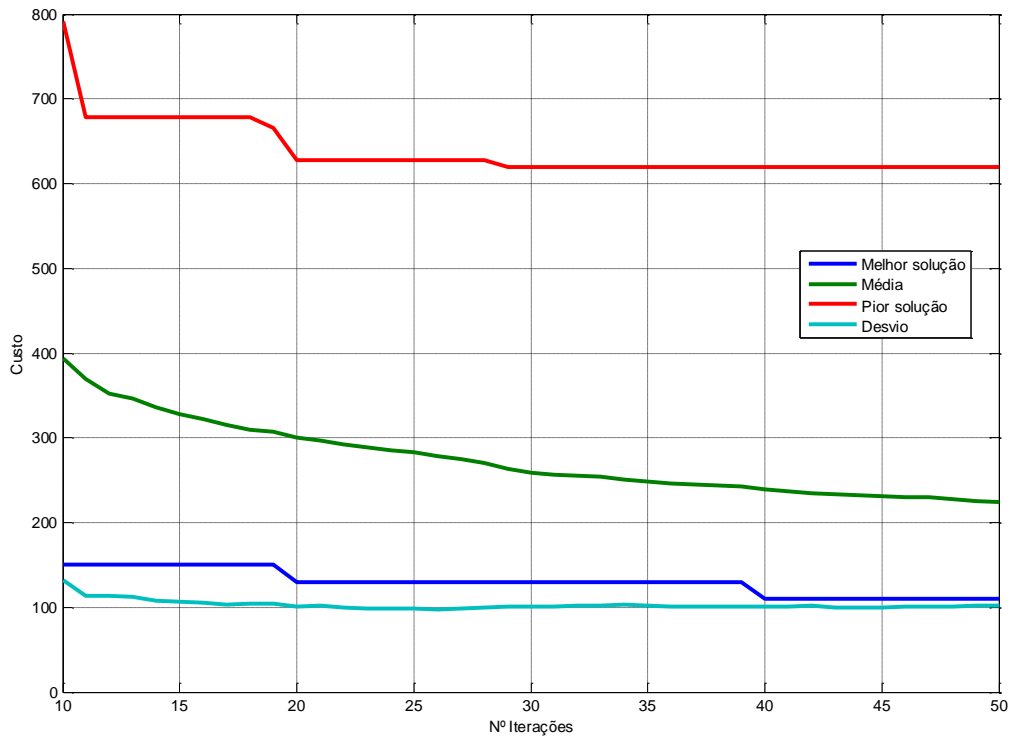


Figura 29. Evolução da convergência – 10ª a 50ª Iteração.

#### 6.4. SISTEMA DE GARVER (SEM REDESPACHO) – INTERRUPTÃO DAS BUSCAS ALEATÓRIAS

A configuração que permite uma parada das buscas aleatórias após um determinado número de repetições foi utilizada neste estudo de caso. O número de iterações até a parada das buscas aleatórias é 20. Este valor foi escolhido da observação do gráfico de desempenho do estudo de caso anterior, onde se verifica que a pior solução tem muito pouca evolução após tal iteração.

O método foi executado com 50 iterações, em um tempo total de 1813 segundos (aproximadamente 30 minutos), uma média de 36 segundos por iteração.

As figuras de 30 a 35 apresentam algumas amostras da evolução das cinco melhores soluções em suas respectivas iterações.

Soluções - 5 melhores perfis de investimento

---

Iteração: 0  
 O tempo desta iteração foi (em segundos): 2.489

Barras		Perfis (Número de Novas LTs)				
Início	Fim	1°	2°	3°	4°	5°
1	2	5	6	1	7	1
1	3	5	8	9	3	7
1	4	1	6	1	0	0
1	5	7	8	0	1	3
1	6	1	0	1	1	0
2	3	1	0	1	5	5
2	4	8	4	1	1	8
2	5	3	0	0	4	7
2	6	2	2	5	2	8
3	4	1	0	10	9	5
3	5	0	3	4	2	3
3	6	0	6	3	1	2
4	5	1	1	4	4	2
4	6	7	5	8	2	4
5	6	5	1	0	5	2

Custo de investimento					
1°	2°	3°	4°	5°	
1.7880	1.9060	2.0260	2.0420	2.0620	

---

Figura 30. Solução inicial.

Iteração: 1  
 O tempo desta iteração foi (em segundos): 34.112

Barras		Perfis (Número de Novas LTs)				
Início	Fim	1°	2°	3°	4°	5°
1	2	3	2	4	0	0
1	3	0	1	3	0	3
1	4	0	0	1	2	5
1	5	11	9	3	6	0
1	6	1	0	0	1	0
2	3	2	1	2	3	1
2	4	4	2	0	0	0
2	5	1	0	1	6	2
2	6	2	3	0	3	7
3	4	0	0	0	0	2
3	5	6	6	1	0	0
3	6	0	0	6	0	1
4	5	1	1	0	4	0
4	6	5	0	4	2	7
5	6	0	6	3	2	0

Custo de investimento					
1°	2°	3°	4°	5°	
1.0320	1.0370	1.0760	1.0780	1.0820	

---

Figura 31. 1ª iteração.

```

-----
Iteração: 19
O tempo desta iteração foi (em segundos): 36.502
{ Barras }|{|Perfis(Número de Novas LTS)}
{Início Fim }|{| 1° 2° 3° 4° 5°}
  1  2  0  0  0  0  0
  1  3  0  0  0  0  0
  1  4  0  1  0  0  0
  1  5  0  0  2  0  0
  1  6  0  0  0  0  0
  2  3  0  0  0  0  0
  2  4  0  0  0  1  0
  2  5  0  0  0  0  1
  2  6  4  4  5  3  3
  3  4  0  0  0  0  0
  3  5  3  1  1  2  1
  3  6  0  0  0  0  1
  4  5  0  0  0  0  1
  4  6  2  2  2  4  2
  5  6  0  0  0  0  0

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° }
 240.0000 260.0000 270.0000 290.0000 312.0000

```

-----  
**Figura 32. 19ª Iteração.**  
-----

```

-----
Iteração: 20
O tempo desta iteração foi (em segundos): 36.532
{ Barras }|{|Perfis(Número de Novas LTS)}
{Início Fim }|{| 1° 2° 3° 4° 5°}
  1  2  0  0  0  0  0
  1  3  0  0  0  0  0
  1  4  0  1  0  0  0
  1  5  0  0  2  0  0
  1  6  0  0  0  0  0
  2  3  0  0  0  0  0
  2  4  0  0  0  1  0
  2  5  0  0  0  0  1
  2  6  4  4  5  3  3
  3  4  0  0  0  0  0
  3  5  3  1  1  2  1
  3  6  0  0  0  0  1
  4  5  0  0  0  0  1
  4  6  2  2  2  4  2
  5  6  0  0  0  0  0

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° )
 240.0000 260.0000 270.0000 290.0000 312.0000

```

-----  
**Figura 33. 20ª Iteração.**  
-----

```

-----
Iteração: 21
O tempo desta iteração foi (em segundos): 36.404
{ Barras }|{|Perfis(Número de Novas LTS)}
{Início Fim }|{| 1° 2° 3° 4° 5°}
  1  2  0  0  0  0  0
  1  3  0  0  0  0  0
  1  4  0  0  1  0  0
  1  5  0  1  0  0  0
  1  6  0  0  0  0  0
  2  3  0  0  0  0  0
  2  4  0  0  0  0  1
  2  5  0  0  0  0  0
  2  6  4  3  4  5  3
  3  4  0  0  0  0  0
  3  5  3  1  1  4  2
  3  6  0  0  0  0  0
  4  5  0  0  0  0  0
  4  6  2  2  2  2  4
  5  6  0  1  0  0  0

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° }
 240.0000 251.0000 260.0000 290.0000 290.0000

```

-----  
**Figura 34. 21ª Iteração.**  
-----

```

-----
Iteração: 50
O tempo desta iteração foi (em segundos): 36.351
{ Barras }|{|Perfis(Número de Novas LTS)}
{Início Fim }|{| 1° 2° 3° 4° 5°}
  1  2  0  0  0  0  0
  1  3  0  0  0  0  0
  1  4  0  0  0  0  0
  1  5  0  0  0  0  0
  1  6  0  0  0  0  0
  2  3  0  0  0  0  0
  2  4  0  0  0  0  0
  2  5  0  0  0  0  0
  2  6  4  4  5  5  4
  3  4  0  0  0  0  0
  3  5  2  1  1  1  3
  3  6  0  0  0  0  0
  4  5  0  0  0  0  0
  4  6  2  3  2  2  2
  5  6  0  0  0  0  0

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° )
 220.0000 230.0000 230.0000 230.0000 240.0000

```

-----  
**Figura 35. 50ª Iteração.**  
-----

No histórico é possível observar que na última iteração executada o método ainda não havia encontrado a solução ótima, apesar de estar muito próximo a ela. Nas três melhores soluções encontradas até aquele momento faltava apenas a retirada de um circuito para chegar à solução ótima. Na melhor solução o circuito desnecessário estava no ramal 3-5, na segunda

melhor no ramal 4-6 e na terceira no ramal 2-6. Desta forma as três se encontravam igualmente próximas à solução ótima, que certamente seria encontrada em mais algumas iterações.

As soluções iniciais apresentaram um custo muito elevado, por isso o gráfico dos parâmetros de convergência é apresentado a partir da 2ª iteração, na Figura 36, e uma visão aproximada no momento em que as buscas aleatórias são terminadas (20ª iteração) é mostrada na Figura 37.

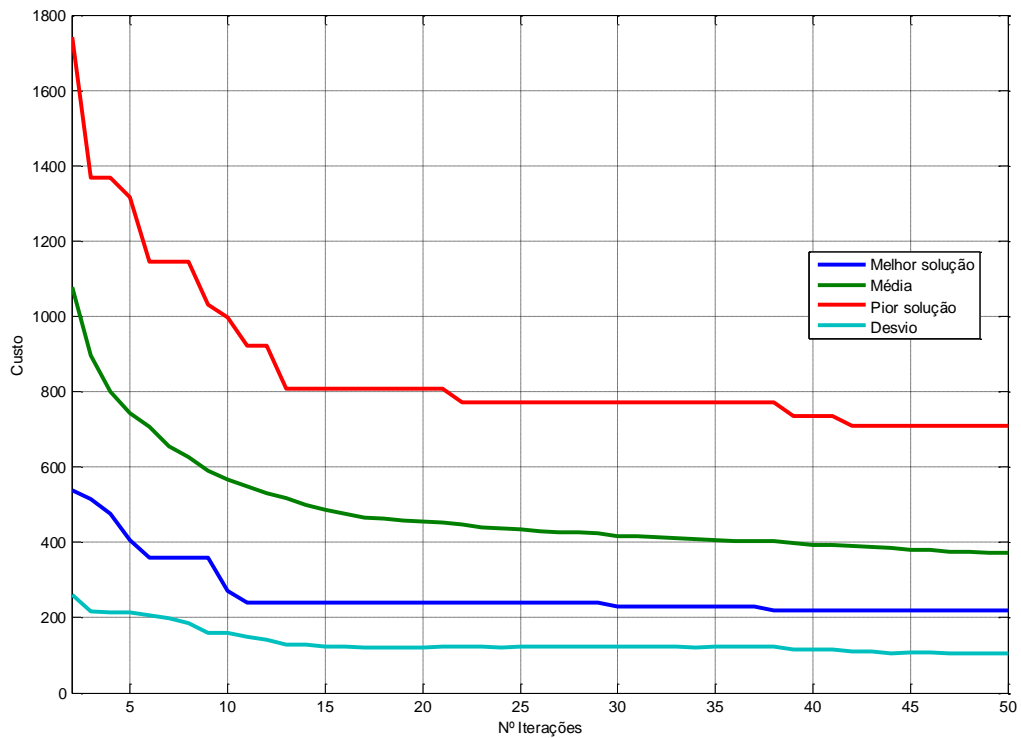


Figura 36. Evolução da convergência.

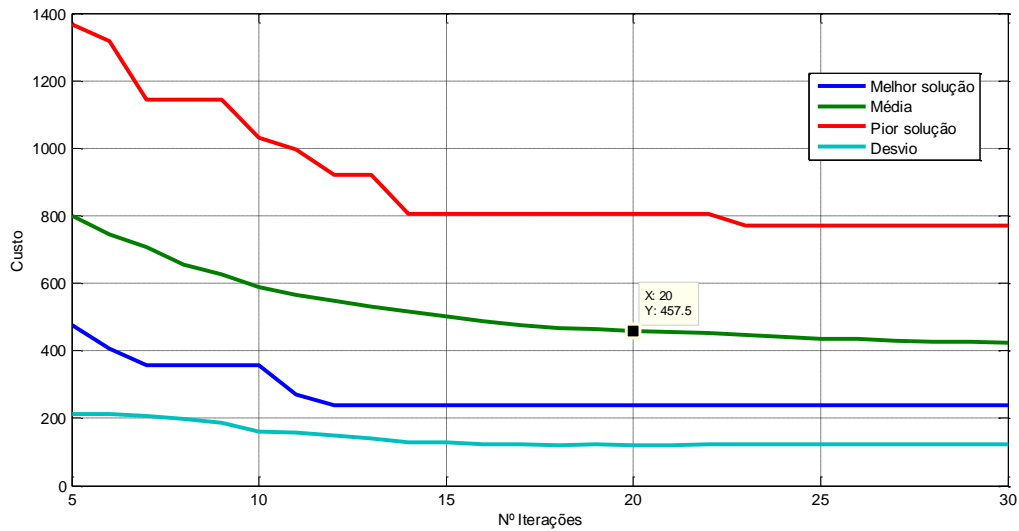


Figura 37. Evolução da convergência – 5ª a 30ª Iterações.

### 6.5. SISTEMA DE GARVER (SEM REDESPACHO) – SOLUÇÕES ALEATÓRIAS COM DIFERENTES PROBABILIDADES

A geração de soluções aleatórias com diferentes probabilidades foi utilizada neste estudo para as soluções iniciais. Escolheu-se aumentar a probabilidade de ocorrência de zero circuito em cada ramal. Esta escolha deve-se ao conhecimento da solução ótima do Sistema de Garver, onde não aparecem circuitos na maioria dos ramos.

Neste estudo foram realizadas 50 iterações, em 1994 segundos (aproximadamente 33 minutos), uma média de 40 segundos por iteração. As Figuras 38 a 41 mostram as melhores soluções em quatro iterações.

```

-----
Iteração: 0
O tempo desta iteração foi (em segundos): 2.880
{ Barras }|{|Perfis(Número de Novas LTs)}
{Início Fim }|{| 1° 2° 3° 4° 5°}
  1  2  0  0  0  0  0
  1  3  0  4  0  0  0
  1  4  0  0  0  0  0
  1  5  0  0  0  3  0
  1  6  0  0  0  0  0
  2  3  0  0  0  1  0
  2  4  4  0  3  3  4
  2  5  1  0  3  0  4
  2  6  4  3  6  3  4
  3  4  0  5  3  1  4
  3  5  2  4  1  2  2
  3  6  0  0  4  0  0
  4  5  0  0  0  0  0
  4  6  3  5  0  4  5
  5  6  1  0  0  5  0

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° }
 502.0000 767.0000 782.0000 814.0000 830.0000

```

-----  
**Figura 38. Soluções iniciais.**  
 -----

```

Iteração: 6
O tempo desta iteração foi (em segundos): 42.240
{ Barras }|{|Perfis(Número de Novas LTs)}
{Início Fim }|{| 1° 2° 3° 4° 5°}
  1  2  0  0  0  1  0
  1  3  0  0  0  1  0
  1  4  0  0  0  0  0
  1  5  0  2  2  0  1
  1  6  0  0  0  0  0
  2  3  0  1  0  0  1
  2  4  0  0  1  0  2
  2  5  0  0  2  2  0
  2  6  4  6  6  4  4
  3  4  0  0  1  0  0
  3  5  1  1  0  0  2
  3  6  1  0  0  0  0
  4  5  0  0  0  0  0
  4  6  3  2  0  2  2
  5  6  0  0  0  1  1

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° }
 278.0000 320.0000 381.0000 381.0000 401.0000

```

-----  
**Figura 40. 6ª Iteração.**  
 -----

```

-----
Iteração: 1
O tempo desta iteração foi (em segundos): 37.757
{ Barras }|{|Perfis(Número de Novas LTs)}
{Início Fim }|{| 1° 2° 3° 4° 5°}
  1  2  0  0  0  0  0
  1  3  0  2  0  2  0
  1  4  1  0  0  0  1
  1  5  0  4  1  6  0
  1  6  0  0  0  0  0
  2  3  0  0  0  0  0
  2  4  4  0  3  0  2
  2  5  0  1  2  4  5
  2  6  6  3  5  3  3
  3  4  0  0  0  0  0
  3  5  2  2  1  1  0
  3  6  0  0  0  0  0
  4  5  0  0  2  0  0
  4  6  2  7  2  4  4
  5  6  0  0  0  1  2

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° }
 500.0000 527.0000 558.0000 611.0000 627.0000

```

-----  
**Figura 39. 1ª Iteração.**  
 -----

```

Iteração: 50
O tempo desta iteração foi (em segundos): 41.172
{ Barras }|{|Perfis(Número de Novas LTs)}
{Início Fim }|{| 1° 2° 3° 4° 5°}
  1  2  0  0  0  0  0
  1  3  0  0  0  0  0
  1  4  0  0  0  0  0
  1  5  0  0  1  0  0
  1  6  0  0  0  0  0
  2  3  0  0  0  0  0
  2  4  0  0  0  0  0
  2  5  0  0  0  0  0
  2  6  4  5  4  3  3
  3  4  0  0  0  0  0
  3  5  2  2  3  1  0
  3  6  0  0  0  0  0
  4  5  0  0  0  1  0
  4  6  3  2  2  3  2
  5  6  0  0  0  0  2

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° }
 250.0000 250.0000 260.0000 263.0000 272.0000

```

-----  
**Figura 41. 50ª Iteração.**  
 -----

Na Figura 38 é possível ver como as soluções iniciais apresentaram melhores resultados do que nas configurações anteriores. Esta vantagem obtida com as melhores soluções iniciais faz com que, já na 6ª iteração (Figura 40) a melhor solução apresente um

custo próximo ao da solução ótima. Na Figura 41, observa-se que o valor ótimo ainda não havia sido encontrado.

Os gráficos de análise de convergência são mostrados nas Figuras 42 e 43.

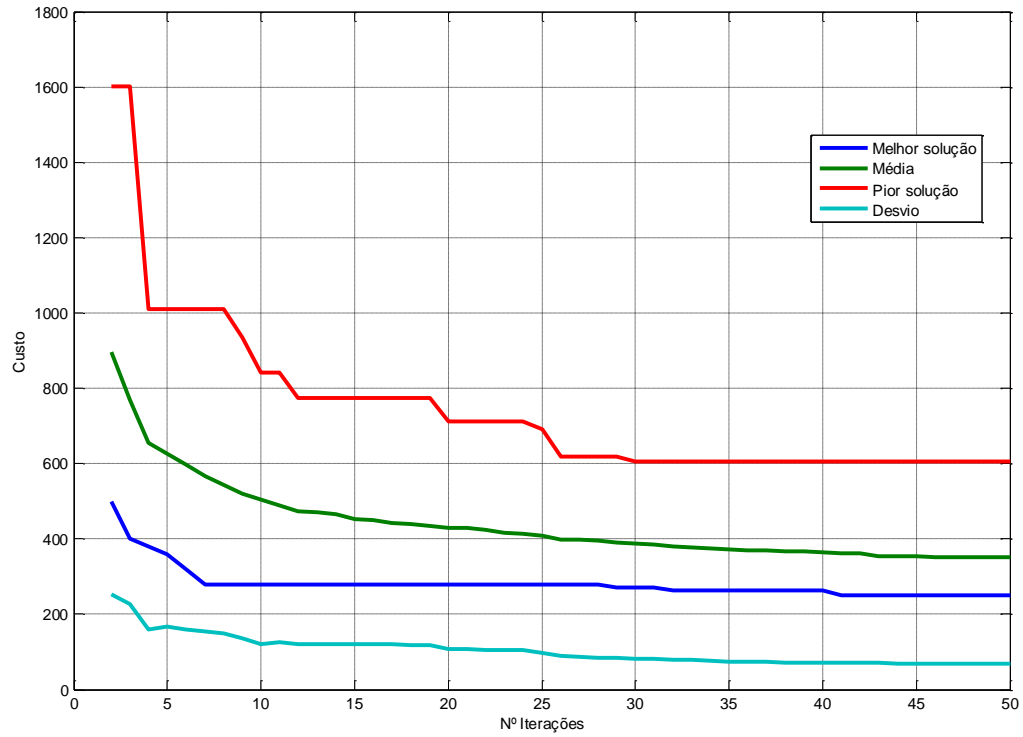


Figura 42. Evolução da convergência – 1ª a 50ª Iterações.



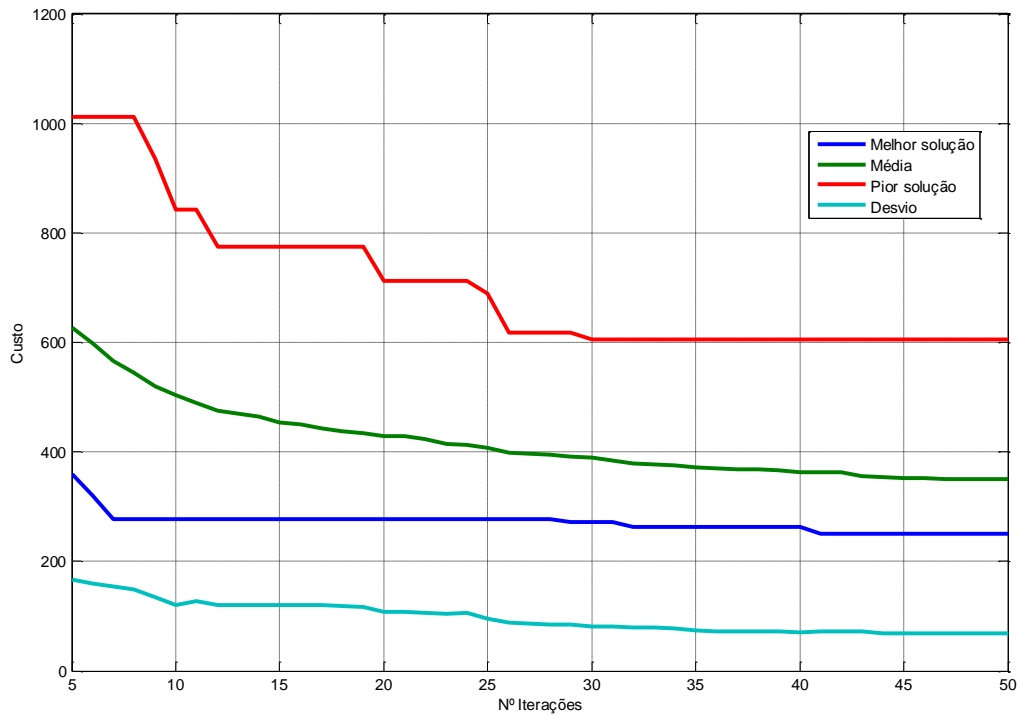


Figura 43. Evolução da convergência – 5<sup>a</sup> a 50<sup>a</sup> Iterações.

Na Figura 42, observa-se que os parâmetros de convergência, em especial a média, apresentam resultados superiores às configurações anteriores nas primeiras iterações. O detalhamento, na Figura 43, indica a evolução da convergência após as primeiras iterações.

Esta melhoria, apesar de ainda não apresentar resultados conclusivos sobre sua qualidade, esta incorporada ao método nos próximos estudos.

## 6.6. SISTEMA DE GARVER (SEM REDESPACHO) – BUSCA LATERALIZADA

A utilização da busca feita preferencialmente em regiões com menor número de circuitos é feita neste estudo. Foram realizadas 20 iterações, em 820 segundos (aproximadamente 13 minutos), uma média de 41 segundos por iteração. As Figuras 44 a 49 mostram a resposta do sistema em algumas de suas iterações.

```

-----
Iteração: 0
O tempo desta iteração foi (em segundos): 3.006
{ Barras }|{|Perfis(Número de Novas LTs)}
{Início Fim }|{| 1° 2° 3° 4° 5°}
  1  2  2  0  0  0  1
  1  3  0  4  4  0  0
  1  4  1  4  0  2  5
  1  5  6  2  0  0  5
  1  6  0  2  6  2  0
  2  3  0  4  6  1  5
  2  4  0  0  0  6  5
  2  5  0  0  0  3  0
  2  6  4  5  0  4  0
  3  4  0  0  0  0  0
  3  5  1  3  1  5  0
  3  6  0  0  0  0  1
  4  5  0  0  0  0  0
  4  6  3  0  5  0  6
  5  6  0  0  1  2  0

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° }
  490.0000  858.0000  911.0000  951.0000  968.0000

```

-----  
**Figura 44. Solução inicial.**  
-----

```

-----
Iteração: 1
O tempo desta iteração foi (em segundos): 39.110
{ Barras }|{|Perfis(Número de Novas LTs)}
{Início Fim }|{| 1° 2° 3° 4° 5°}
  1  2  0  1  0  0  0
  1  3  0  0  0  0  0
  1  4  0  0  2  0  0
  1  5  0  0  0  1  0
  1  6  0  0  0  0  0
  2  3  0  1  0  1  2
  2  4  1  1  0  0  2
  2  5  0  1  2  0  0
  2  6  7  6  4  4  0
  3  4  0  0  1  0  0
  3  5  3  2  0  1  1
  3  6  0  1  0  0  0
  4  5  0  0  0  1  2
  4  6  0  0  2  0  6
  5  6  0  0  0  3  0

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° )
  310.0000  399.0000  421.0000  426.0000  446.0000

```

-----  
**Figura 45. 1ª Iteração.**  
-----

```

-----
Iteração: 9
O tempo desta iteração foi (em segundos): 40.354
{ Barras }|{|Perfis(Número de Novas LTs)}
{Início Fim }|{| 1° 2° 3° 4° 5°}
  1  2  0  0  0  0  0
  1  3  0  0  0  0  0
  1  4  0  0  0  0  0
  1  5  0  0  0  0  0
  1  6  0  0  0  0  0
  2  3  0  0  0  0  1
  2  4  0  0  0  0  0
  2  5  0  0  0  0  0
  2  6  4  4  4  4  4
  3  4  0  0  0  0  0
  3  5  1  2  2  2  1
  3  6  0  0  0  0  0
  4  5  0  0  0  0  0
  4  6  2  2  2  2  2
  5  6  0  0  0  0  0

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° )
  200.0000  220.0000  220.0000  220.0000  220.0000

```

-----  
**Figura 46. 9ª Iteração.**  
-----

```

-----
Iteração: 11
O tempo desta iteração foi (em segundos): 39.696
{ Barras }|{|Perfis(Número de Novas LTs)}
{Início Fim }|{| 1° 2° 3° 4° 5°}
  1  2  0  0  0  0  0
  1  3  0  0  0  0  0
  1  4  0  0  0  0  0
  1  5  0  0  0  0  0
  1  6  0  0  0  0  0
  2  3  0  0  0  0  0
  2  4  0  0  0  0  0
  2  5  0  0  0  0  0
  2  6  4  4  4  4  4
  3  4  0  0  0  0  0
  3  5  1  1  2  2  2
  3  6  0  0  0  0  0
  4  5  0  0  0  0  0
  4  6  2  2  2  2  2
  5  6  0  0  0  0  0

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° )
  200.0000  200.0000  220.0000  220.0000  220.0000

```

-----  
**Figura 47. 11ª Iteração.**  
-----

```

-----
Iteração: 17
O tempo desta iteração foi (em segundos): 41.210
{ Barras }|{Perfis(Número de Novas LTs)}
{Início Fim }|{ 1° 2° 3° 4° 5° }
  1  2  0  0  0  0  0
  1  3  0  0  0  0  0
  1  4  0  0  0  0  0
  1  5  0  0  0  0  0
  1  6  0  0  0  0  0
  2  3  0  0  0  0  0
  2  4  0  0  0  0  0
  2  5  0  0  0  0  0
  2  6  4  4  4  4  4
  3  4  0  0  0  0  0
  3  5  1  1  1  2  2
  3  6  0  0  0  0  0
  4  5  0  0  0  0  0
  4  6  2  2  2  2  2
  5  6  0  0  0  0  0

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° }
200.0000 200.0000 200.0000 220.0000 220.0000

```

-----  
 Figura 48. 17ª Iteração.

```

-----
Iteração: 20
O tempo desta iteração foi (em segundos): 40.672
{ Barras }|{Perfis(Número de Novas LTs)}
{Início Fim }|{ 1° 2° 3° 4° 5° }
  1  2  0  0  0  0  0
  1  3  0  0  0  0  0
  1  4  0  0  0  0  0
  1  5  0  0  0  0  0
  1  6  0  0  0  0  0
  2  3  0  0  0  0  0
  2  4  0  0  0  0  0
  2  5  0  0  0  0  0
  2  6  4  4  4  4  4
  3  4  0  0  0  0  0
  3  5  1  1  1  1  2
  3  6  0  0  0  0  0
  4  5  0  0  0  0  0
  4  6  2  2  2  2  2
  5  6  0  0  0  0  0

      Custo de investimento
{ 1° 2° 3° 4° 5° }
200.0000 200.0000 200.0000 200.0000 220.0000

```

-----  
 Figura 49. 20ª Iteração.

É possível observar que já na 9ª iteração (Figura 46) o método havia encontrado a solução ótima. Na 11ª iteração (Figura 47), a solução ótima havia sido encontrada por dois diferentes caminhos. Na 17ª (Figura 48), por três diferentes caminhos. Em sua última iteração (Figura 49), o método havia encontrado a solução ótima por quatro diferentes caminhos.

O gráfico na Figura 50 mostra a evolução da convergência do método.

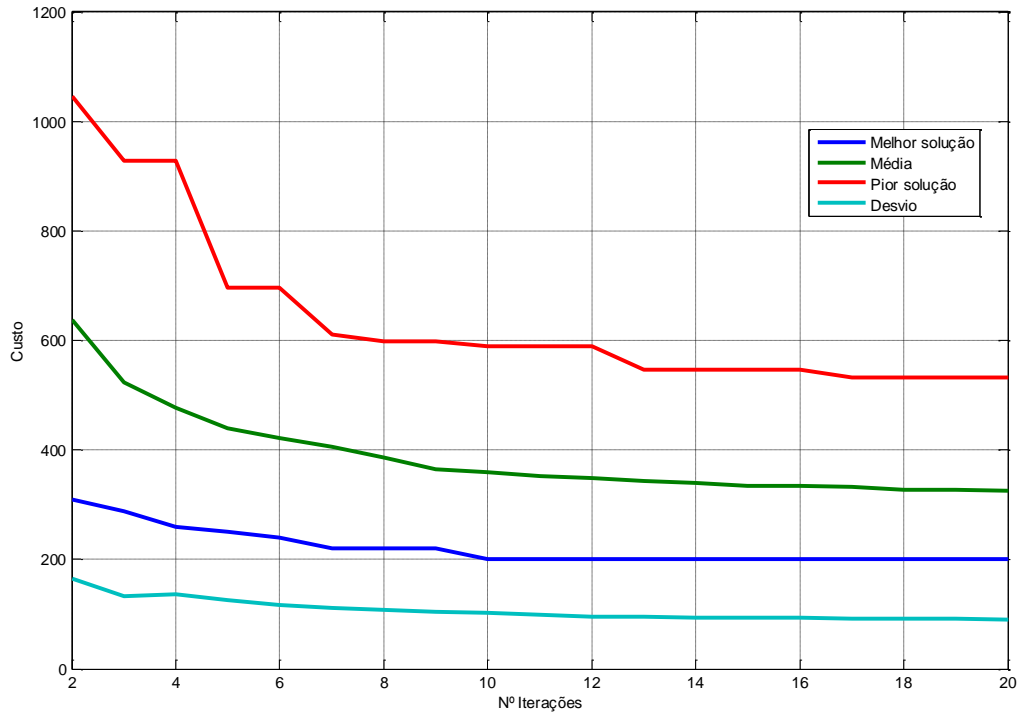


Figura 50. Evolução da convergência – 2<sup>a</sup> a 20<sup>a</sup> Iterações.

Devido à sua rápida convergência, esta configuração é considerada a melhor desenvolvida pelo autor.

## 7. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Uma análise inicial dos resultados, em 6.1, identifica a possibilidade de aplicação do método baseado em inteligência de enxames ao problema proposto. A solução ótima do problema estudado pôde ser encontrada desde a implementação do método mais básico.

Algumas das melhorias propostas apresentaram significativa diferença quando foram testadas. É o caso da busca dinâmica, realizado na seção 6.2. Atribuí-se o aumento de velocidade de convergência e diminuição do tempo das iterações a duas características: a imediata escolha por uma melhor solução, antes de considerar todas as outras soluções da mesma vizinhança, e a diminuição do número de variáveis.

O princípio, explicado na seção de melhorias do método, foi confirmado porque a solução ótima passou a ser encontrada com um número menor de iterações. A diminuição do número de variáveis, e conseqüentemente da memória de máquina, levam a um tempo menor de iteração. Esta diminuição é possível porque nesta configuração não é necessário armazenar todas as soluções de uma vizinhança, para então compará-las. Ao comparar a solução já conhecida com uma nova solução no momento em que esta é pesquisada, é possível descartar a pior solução. Como este processo é repetido muitas vezes a cada iteração, a economia no uso das variáveis se torna expressivo.

Outro caso de melhoria proposta que mostrou bons resultados quando aplicadas foram as soluções aleatórias com probabilidades, abordada na seção 6.5. Como o universo de soluções é muito grande, iniciar a busca em regiões mais prováveis se mostrou vantajoso. Observa-se que neste caso é necessário um conhecimento aproximado da solução ótima. Caso as probabilidades sejam utilizadas incorretamente, a convergência do método é prejudicada.

Ressalta-se, porém, que mesmo com esta vantagem obtida por soluções melhores nas primeiras iterações, não há melhora na convergência do sistema. Tem-se desta forma que a dificuldade de convergência do método não depende somente de suas soluções iniciais.

A comparação entre os estudos de caso 6.2 e 6.3 indica que o sistema funciona da mesma forma com ou sem redespacho de geração. Considera-se com isso que o modelo CC utilizado atua de forma semelhante nos dois tipos de perfil de geração.

A inclusão das buscas com preferência por regiões com menor número de circuitos, no caso da seção 6.6, apresentou significativa melhora na velocidade de convergência do método.

A proposta de interrupção das buscas aleatórias (seção 6.4), não apresentou resultados positivos. Atribui-se a isto o fato de que o número de buscas aleatórias é muito pequeno se comparado ao total de buscas realizado em cada iteração (cerca de 5% das buscas). Para o método se tornar sensível a este tipo de configuração, os parâmetros do algoritmo devem ser alterados para aumentar a quantidade de soluções abandonadas a cada iteração.

O uso da informação sobre a convergência da melhor solução e o momento de sua chegada ao ótimo global deve ser feita com cautela. Por se tratar de um mecanismo de buscas aleatórias, em uma dada execução a convergência da melhor solução pode ser muito superior às outras, não indicando necessariamente uma melhor qualidade do método. Por outro lado, quando a esta não tem evolução durante muitas iterações, indica que não haverá mais progresso.

Os demais parâmetros (média, pior solução e desvio padrão) servem apenas para acompanhar a evolução do processo e indicar a diversidade das soluções.

## **8. APLICAÇÃO DO MÉTODO A SISTEMAS MAIS COMPLEXOS**

A melhor configuração encontrada pelo autor foi aplicada ao problema de expansão de um sistema de transmissão com 46 barras e 79 ramais, com dados no Anexo 4. O método desenvolvido se mostrou insuficiente para resolver um problema com esta complexidade.

Como em diversos algoritmos de sistemas biológicos, o algoritmo das abelhas possui boa aceitação de ótimos locais. Em sistemas com universos de soluções maiores, são prováveis as ocorrências de ótimos locais com valores muito ruins. Para evitar tais soluções ruins, é proposto utilizar outro método para melhorar as soluções iniciais do método desenvolvido. Os métodos construtivos, apesar de não garantirem a otimização das soluções, podem ser uma boa alternativa para determinar as soluções iniciais.

## 9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de um método de otimização baseado no algoritmo das abelhas se mostrou uma alternativa interessante, embora sejam necessários mais testes em sistemas de maior porte para avaliar seu real desempenho. Após um entendimento inicial do funcionamento do método e configuração de seus parâmetros, é relativamente rápida sua aplicação ao problema da expansão de sistemas elétricos.

O sistema desenvolvido é muito flexível, e pode ser aplicado para diversas abordagens diferentes do problema de planejamento da expansão. No caso dos sistemas de transmissão, por exemplo, um tema de recente estudo é a retirada de LT existentes (Santos, 2007). O método desenvolvido pode rapidamente ser preparado para estudos sobre este tema.

Esta flexibilidade do método vai além, fazendo com que ele seja útil em diversas áreas de conhecimento. Por isso o desenvolvimento do método tem um valor agregado superior a somente a solução do problema proposto, pois seu conhecimento proporciona possibilidades de desenvolvimento em diversas áreas.

Para se tornar aplicável a sistemas de grande porte, é necessário aumentar o desempenho do método. Um sistema híbrido, que utilize diversos métodos de busca, é visto como uma solução para aumentar tanto a velocidade quanto a robustez da busca por uma solução ótima.

Os códigos escritos em Matlab necessários para a execução dos estudos realizados. Estes podem ser vistos nos Anexos 1, 2, 3 e 6. Espera-se assim aumentar o valor deste documento como fonte de consulta.

Espera-se por fim, que este projeto inicial sirva de incentivo para novos estudos sobre a aplicação do algoritmo baseado em inteligência de abelhas, especialmente na área de expansão de sistemas elétricos.



## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Brasília: Aneel. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 13 jul. 2011.
- AUGUSTUS, G. Introdução ao Escalonamento e Aplicações. Inteligência de Enxames e o Algoritmo das Abelhas. Monografia. USP, 2009.
- AZEVEDO, A. MOTA, A. MOTA, L. OLIVEIRA, A. CARVALHO, M. SOARES FILHO, S. FRANÇA, A. Visualização de Soluções de Fluxo de Potência Ótimo DC Via Método de Pontos Interiores Para Sistemas Elétricos de Grande Porte. Artigo. XXXVII SBPO. 2005.
- BEES ALGORITHM. Cardiff University: the Bees Algorithm; c2008. Disponível em: <<http://www.bees-algorithm.com/index.php>>. Acesso em: 13 jul. 2011.
- ELETROBRÁS, GCPS. Plano Decenal de Expansão 1998/2007.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. EPE, c2009. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 13 jul. 2011.
- FLORES, M. J. F. Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão Usando os Modelos CC-CA e Técnicas de Programação Não-Linear. Tese de Doutorado. Unicamp, 2006.
- GALLEGO, L.A. RIDER, M. J. ROMERO, R. GARCIA, A. V. A Specialized Genetic Algorithm to Solve the Short Term Transmission Network Expansion Planning. Artigo. IEEE Bucharest PowerTech. 2009.
- HAFFNER, S. L. O Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos no Contexto de um Ambiente Competitivo. Tese de Doutorado. Unicamp, 2000.
- IDRIS, R. M. KHARUDDIN, A. MUSTAFA, M. W. Optimal choice of FACTS devices for ATC enhancement using Bees Algorithm. Australasian Universities Power Engineering Conference, 2009. AUPEC 2009.
- KAVITHA, D. SWARUP, K. S. Transmission Expansion Planning Using LP - Based Particle Swarm Optimization. Artigo. IEEE Power India Conference. 2006.
- LACERDA, E. G. M. DE. Algoritmos Genéticos e as outras técnicas de otimização. Slides de Aula. UFRN, 2009.
- LACERDA, E. G. M. DE. Implementação de Otimização Colônia de Formigas. Slides de Aula. UFRN.
- MIASAKI, C. T. Planejamento da Expansão do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica Utilizando Controladores FACTS. Tese de Doutorado. Unesp Ilha Solteira, SP, 2006.

- MOGHADDAM, S. Z. MONSEF, H. JAFARI, M. A New Heuristic Method For Transmission Expansion Planning Using AHP. Artigo. Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 10th International. 2011.
- MORI, H. IIMURA, Y. Transmission Network Expansion Planning with a Hybrid Meta-heuristic Method of Parallel Tabu Search and Ordinal Optimization. Artigo. International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, 2007. ISAP 2007.
- MURTHY, B.V.S.K. Yemula, P. Khaparde, S.A. A Comprehensive Two Level Heuristic Approach to Transmission Expansion Planning. Artigo. Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. ONS, c2011. Disponível em: <www.ons.br>. Acesso em: 13 jul. 2011.
- PRIOR, A. CASTRO, L. Um Algoritmo de Enxame Construtivo para Agrupamento de Dados. Artigo. XVIII Congresso Brasileiro de Automática. 2010.
- RIDER, M. J. GALLEGO, L. A. ROMERO, R. GARCÍA, A. V. Heuristic Algorithm to Solve the Short Term Transmission Network Expansion Planning. Artigo. Power Engineering Society General Meeting. IEEE. 2007.
- ROMERO, R. MONTICELLI, A. A hierarchical decomposition approach for transmission network expansion planning. Artigo. IEEE Transactions on Power Systems. 1994.
- ROMERO, R. RIDER, M. J. SILVA, I.de J. A Metaheuristic to Solve the Transmission Expansion Planning. Artigo. IEEE Transactions on Power Systems. 2007.
- RUDNICK, H. PALMA, R. CURA, E. SILVA, C. Economically Adapted Transmission Systems In Open Access Schemes-application of Genetic Algorithms. Artigo. IEEE Transactions on Power Systems. 1996.
- SANTOS, H. C. Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão Considerando a Retirada de Linhas de Transmissão. Dissertação de Mestrado. Unesp Ilha Solteira, SP. 2007.
- SERAPIÃO, A. B. DE S. Fundamentos de Otimização por Inteligência de Enxames: Visão Geral. Artigo. Revista Controle e Automação, Volume 20, número 3. Julho, Agosto e Setembro de 2009.
- SILVA JUNIOR, I. DE J. Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão Considerando Segurança e Planos de Programação da Geração. Tese de Doutorado. Unicamp, 2005.
- VERMA, A. PANIGRAHI, B.K. BIJWE, P.R. Transmission Network Expansion Planning with Adaptive Particle Swarm Optimization. World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing, 2009. NaBIC 2009.
- VINASCO, G. RIDER, M. J. ROMERO, R. A Strategy to Solve the Multistage Transmission Expansion Planning Problem. Artigo. IEEE Transactions on Power Systems. 2011.

## ANEXO 1 – SISTEMA DE GARVER.M

```

% -----
% Arquivo com dados do sistema Garver de 6 barras e 15 linhas
% -----
% Desenvolvido por SHaffner em maio de 2011
% -----
% Variaveis de saida:
% ip      - barra inicial das linhas/transformadores (nlines)
% ep      - barra final das linhas/transformadores (nlines)
% n0      - numero de linhas/transformadores na configuracao inicial
%          (nlines)
% nmax    - numero maximo de linhas/transformadores que pode ser
%          instalado (nlines)
% reat    - reatancia das linhas/transformadores (nlines)
% fmax    - fluxo maximo de potencia ativa nas linhas/transformadores
%          (nlines)
% gmin    - valor minimo de geracao (nbuses)
% gmax    - valor maximo de geracao (nbuses)
% dem     - vetor com a demanda em cada barra (nbuses)
% basemva - base mva do sistema
% -----

%*****
% VALORES SEM REDESPACHO
%          k  MWmin    MWmax
% -----
g1  = [  1    0    50
        3    0   165
        6    0   545 ];
%*****
% VALORES COM REDESPACHO
%          k  MWmin    MWmax
% -----
g2  = [  1    0    150
        3    0   360
        6    0   600 ];
%*****
geracao = g1;    % SEM REDESPACHO
%geracao = g2;    % COM REDESPACHO
%*****
%DEMANDA_PREVISTA                                5 ITENS
% -----
%          k  Carga_MW
% -----
demanda = [  1    80
             2   240
             3    40
             4   160
             5   240 ];
% -----

```

```

%*****
%DADOS_DAS_LINHAS                                15 ITENS
%-----
%          k   m      NO      Nmax      R[%]      X[%]      MWmax      CInv
%-----
ramos=[  1   2       1       10       0.0       0.40       100.0       40.0
        1   3       0       10       0.0       0.38       100.0       38.0
        1   4       1       10       0.0       0.60        80.0       60.0
        1   5       1       10       0.0       0.20       100.0       20.0
        1   6       0       10       0.0       0.68        70.0       68.0
        2   3       1       10       0.0       0.20       100.0       20.0
        2   4       1       10       0.0       0.40       100.0       40.0
        2   5       0       10       0.0       0.31       100.0       31.0
        2   6       0       10       0.0       0.30       100.0       30.0
        3   4       0       10       0.0       0.59        82.0       59.0
        3   5       1       10       0.0       0.20       100.0       20.0
        3   6       0       10       0.0       0.48       100.0       48.0
        4   5       0       10       0.0       0.63        75.0       63.0
        4   6       0       10       0.0       0.30       100.0       30.0
        5   6       0       10       0.0       0.61        78.0       61.0 ];
%*****

basemva = 100;
nb       = 6;
ip       = ramos(:,1);
ep       = ramos(:,2);
n0       = ramos(:,3);
nmax     = ramos(:,4);
reat     = ramos(:,6);
fmax     = ramos(:,7)/basemva;
cn       = ramos(:,8);
gmin     = zeros(nb,1);
gmax     = zeros(nb,1);
dem      = zeros(nb,1);

for k=1:size(geracao,1)
    gmin(geracao(k,1)) = geracao(k,2)'/basemva;
    gmax(geracao(k,1)) = geracao(k,3)'/basemva;
end

for k=1:length(demanda)
    dem(demanda(k,1)) = demanda(k,2)/basemva;
end

```

## ANEXO 2 – OTIMIZACAO\_ABELHAS.M

```

clear all;
clc;

% Parâmetros da otimização
Abelhas = 100;           % número de abelhas bateadoras (ex: 40-100)
Iteracoes = 0020;      % número de iterações (ex: 1000-5000)
Melhores = 20;         % número de melhores soluções (ex: 10-50) {Melhores
+ Boas < Abelhas}
Boas = 50;             % número de boas soluções (ex: 10-50)      {Melhores
+ Boas < Abelhas}
Abelhas_melhores = 50; % número de abelhas em volta das melhores soluções
(e.g. 10-50)
Abelhas_boas = 30;     % número de abelhas em volta das boas soluções (ex:
10-50)
Raio = 1;              % raio para nova busca na vizinhança

% Acompanhamento da convergencia
% matriz com informacoes a respeito do processo de convergência
% conv(:,1) - valor da melhor solução (menor custo)
% conv(:,2) - valor da média das soluções (média dos custos)
% conv(:,3) - valor da pior solução (maior custo)
% conv(:,4) - valor do desvio padrao das soluções (desvio padrão dos
% custos)
conv = zeros(Iteracoes+1,4);

% Dados do sistema
garver_dat;           % executa garver_dat, tornando as variaveis deste
acessiveis
Barras = nb;         % número de barras
Maximo_de_linhas = nmax; % número máximo de linhas
Minimo_de_linhas = n0; % número de linhas do sistema atual
Linhas = size(ip,1); % quantidade de caminhos possiveis entre as barras
Custo_linha = cn';   % custo de cada linha

% Avaliação do custo do sistema atual
Valor_sistema_atual = 0;
for i = 1:Linhas
    Valor_sistema_atual = Valor_sistema_atual + Minimo_de_linhas(i) *
Custo_linha(i);
end

% Critérios de análise de velocidade das iterações
tempo = zeros(Iteracoes+1,1);

% 1. Iniciando a população de soluções aleatórias com probabilidades
tic
pzero = 0.5;
presto = 1 - pzero;
Solucao = zeros(Linhas,Abelhas);
Solucao_investimento = zeros(Linhas,Abelhas);
for i = 1:Linhas
    for j = 1:Abelhas
        vval = 0:6;
        pval = [pzero (presto/(length(vval)-1)*ones(1,length(vval)-1))];
        Solucao(i,j) = randsrc(1,1,[vval;pval]);
        Solucao_investimento(i,j) = Solucao(i,j);
    end
end

```

```

end

% 2. Avaliação da qualidade das soluções
Custo_nao_atendimento = zeros(1,Abelhas);
Custo = zeros(1,Abelhas);
for i = 1:Abelhas
    n = Solucao_investimento(:,i);
    [x,val,exitflag] =
operacao_DC(ip,ep,n,n0,nmax,reat,fmax,gmin,gmax,dem);
    Custo_nao_atendimento(i) = val*10000;
    Custo_linhas = 0;
    for j = 1:Linhas
        Custo_linhas = Custo_linhas + Solucao_investimento(j,i) *
Custo_linha(j);
    end
    Custo(i) = Custo_nao_atendimento(i) + Custo_linhas;
end
Auxiliar1 = [Solucao_investimento ; Custo]; % Variável auxiliar para
cálculo
Classificacao_Custo = sortrows(Auxiliar1',(Linhas+1)); % Coloca as soluções
em ordem crescente de custo
Display1 = Classificacao_Custo'; % Variável auxiliar para impressão
clc;
disp('5 Melhores Soluções iniciais:'); disp(Display1(:,1:5));
disp('O tempo da solução inicial aleatória foi (t em segundos):');
t = toc %#ok<NOPTS>
tempo(1) = t;
Historico = zeros(Linhas+1,Abelhas,Iteracoes+1);
Historico(:, :, 1) = Display1;
conv(1,:)=[Display1(Linhas+1,1) mean(Display1(Linhas+1,:))
Display1(Linhas+1,Abelhas) std(Display1(Linhas+1,:))];

% 3. Formação de novas soluções, enquanto não se atinge o critério de
parada
Novo = zeros(1,Linhas);
for k = 1:Iteracoes % Critério de parada
    tic
    for j = 1:Melhores % 4. Busca nas vizinhanças das melhores soluções
        for i = 1:Abelhas_melhores % 5. Quantidade de abelhas nos raios das
melhores soluções
            Auxiliar2 = Classificacao_Custo(j,1:Linhas); % Variável
auxiliar para cálculo
            for l = 1:Linhas
                Novo(l) = Auxiliar2(l) + randint(1,1,[-2*Raio,Raio]); %
//Nova solução dentro do raio
                if Novo(l) < 0
                    Novo(l) = 0;
                end
            end
        end
    end

    % 5. Avaliação da qualidade da nova solução
    n = Novo';
    [x,val,exitflag] =
operacao_DC(ip,ep,n,n0,nmax,reat,fmax,gmin,gmax,dem);
    Custo_nao_atendimento(i) = val*10000;
    Custo_linhas = 0;
    for l = 1:Linhas
        Custo_linhas = Custo_linhas + Novo(l) * Custo_linha(l);
    end
    Custo2 = Custo_nao_atendimento(i) + Custo_linhas;
    % Comparação com a qualidade da solução anterior

```

```

        if Custo2 <= Classificacao_Custo(j,Linhas+1)
            Novo2 = [Novo Custo2];
            Classificacao_Custo(j,:) = Novo2; % 7. Seleciona a melhor
solução da região
        end

    end

    end

    for j = Melhores+1:Boas % 4. Busca nas vizinhanças das boas soluções
        for i = 1:Abelhas_boas % 5. Quantidade de abelhas nos raios das
boas soluções
            Auxiliar2 = Classificacao_Custo(j,1:Linhas); % Variável
auxiliar para cálculo
            for l = 1:Linhas
                Novo(l) = Auxiliar2(l) + randint(1,1,[-3*Rao,2*Rao]); %
//Nova solução dentro do raio
                if Novo(l) < 0
                    Novo(l) = 0;
                end
            end

            % 5. Avaliação da qualidade da nova solução
            n = Novo';
            [x,val,exitflag] =
operacao_DC(ip,ep,n,n0,nmax,reat,fmax,gmin,gmax,dem);
            Custo_ao_atendimento(i) = val*10000;
            Custo_linhas = 0;
            for l = 1:Linhas
                Custo_linhas = Custo_linhas + Novo(l) * Custo_linha(l);
            end
            Custo2 = Custo_ao_atendimento(i) + Custo_linhas;
            % Comparação com a qualidade da solução anterior
            if Custo2 <= Classificacao_Custo(j,Linhas+1)
                Novo2 = [Novo Custo2];
                Classificacao_Custo(j,:) = Novo2; % 7. Seleciona a melhor
solução da região
            end

        end

    end

    % 7. Abandono das piores soluções e novas buscas aleatorias
    Solucao2 = zeros(Linhas,Abelhas-Boas);
    Solucao2_investimento = zeros(Linhas,Abelhas-Boas);
    for i = 1:Linhas
        for j = 1:Abelhas-Boas
            Solucao2(i,j) =
randint(1,1,[Minimo_de_linhas(i),Maximo_de_linhas(i)]);
            Solucao2_investimento(i,j) = Solucao2(i,j) -
Minimo_de_linhas(i);
        end
    end

    % 7. Avaliação das qualidades das novas soluções
    Custo3 = zeros(1,Abelhas-Boas);
    Custo_ao_atendimento2 = zeros(1,Abelhas-Boas);
    for i = 1:Abelhas-Boas
        n = Solucao2_investimento(:,i);
        [x,val,exitflag] =
operacao_DC(ip,ep,n,n0,nmax,reat,fmax,gmin,gmax,dem);

```

```

        Custo_nao_atendimento2(i) = val*10000;
        Custo_linhas = 0;
        for j = 1:Linhas
            Custo_linhas = Custo_linhas + Solucao2_investimento(j,i) *
Custo_linha(j);
        end
        Custo3(i) = Custo_nao_atendimento(i) + Custo_linhas;
    end

    Auxiliar3 = [Solucao2_investimento ; Custo3]; % Variável auxiliar para
cálculo
    Auxiliar4 = Auxiliar3'; % Soluções aleatórias

    Auxiliar5 = Classificacao_Custo(1:Boas,:); % Soluções resultantes da
refinação
    Auxiliar6 = [Auxiliar5 ; Auxiliar4]; % Soluções resultantes da
refinação concatenadas com as aleatórias
    Classificacao_Custo = sortrows(Auxiliar6, (Linhas+1));
    Display2 = Classificacao_Custo'; % Variável auxiliar para impressão
    disp(sprintf(' '));
    disp(sprintf('5 Melhores Soluções da iteração: %02.0f',k));
    disp(Display2(:,1:5));
    Historico(:, :, k+1) = Display2;
    disp('O tempo desta iteração foi (t em segundos):')
    t = toc %#ok<NOPTS>
    tempo(k+1) = t;
    conv(k+1, :) = [Display2(Linhas+1,1) mean(Display2(Linhas+1,1:Boas))
Display2(Linhas+1,Boas) std(Display2(Linhas+1,1:Boas))];
end

% Apresentação do histórico dos melhores resultados de cada iteração
clc;
disp(sprintf(' Soluções - 5 melhores perfis de investimento'));
disp('-----');
for i = 1:Iteracoes+1
    disp('-----');
    disp(sprintf('Iteração: %d', i-1));
    disp(sprintf('O tempo desta iteração foi (em segundos): %6.3f',
tempo(i)));
    disp(sprintf('{ Barras }|{Perfis(Número de Novas LTs)}'));
    disp(sprintf('{Início Fim }|{ 1° 2° 3° 4° 5°}'));
    disp([ip ep Historico(1:Linhas,1:5,i)]);
    disp(sprintf(' Custos de investimento'));
    disp(sprintf('{ 1° 2° 3° 4° 5° }'));
    disp(Historico(Linhas+1,1:5,i));
end
ttotal=0;
for i = 1:Iteracoes+1
    ttotal = ttotal + tempo(i);
end
disp(sprintf('O tempo total do método foi (em segundos): %6.3f', ttotal));

% Gráfico dos critérios de análise de convergência
k = 0:Iteracoes;
figure(1)
plot(k, conv(:,1), k, conv(:,2), k, conv(:,3), k, conv(:,4))
grid on
legend('Melhor solução', 'Média', 'Pior solução', 'Desvio', 'Location', 'Best')

```



### ANEXO 3 – OPERACAO\_DC.M

```

function [x,val,exitflag] =
operacao_DC(ip,ep,n,n0,nmax,reat,fmax,gmin,gmax,dem)
% Funcao para solucao do problema de operacao do sistema. O modelo de
% otimizacao considerado corresponde ao despacho da geracao disponivel
% respeitando o limite de capacidade das linhas da configuracao base (n0)
% e adicionadas (n), bem como geracoes ficticias que representam o corte
% de carga.
% -----
% Desenvolvido por SHaffner em maio de 2011
% -----
% O modelo linear de otimizacao que descreve o problema de despacho da
% geracao eh assim caracterizado:
% a) variaveis:
%   a.1) angulo de fase das tensoes nodais (nbuses)
%   a.2) injecao (geracao) de potencia nas barras (nbuses)
%   a.3) cortes de carga nas barras (nbuses)
% b) funcao objetivo: minimizacao do corte de carga
% c) restricoes:
%   c.1) balanco de potencia ativa (nbuses restricoes de igualdade)
%   c.2) limites de abertura angular nas linhas/transformadores (2*nlines
%       restricoes de desigualdade)
% d) limites nas variaveis:
%   b.1) limites para angulos de fase de -pi para +pi (nbuses)
%   b.2) limites minimo e maximo de injecao nas barras de geracao
(nbuses)
%   b.3) limite de corte de carga nas barras (nbuses)
% -----
% Variaveis de entrada:
% ip - barra inicial das linhas/transformadores (nlines)
% ep - barra final das linhas/transformadores (nlines)
% n - numero de linhas/transformadores adicionados (nlines)
% n0 - numero de linhas/transformadores na configuracao inicial
(nlines)
% nmax - numero maximo de linhas/transformadores que pode ser instalado
(nlines)
% reat - reatancia das linhas/transformadores (nlines)
% fmax - fluxo maximo de potencia ativa nas linhas/transformadores
(nlines)
% gmin - valor minimo de geracao (nbuses)
% gmax - valor maximo de geracao (nbuses)
% dem - vetor com a demanda em cada barra (nbuses)
% -----
% Variaveis internas:
% f - vetor dos coeficientes da funcao objetivo (nbuses)
% A - matriz dos coeficientes das restricoes lineares de desigualdade
(2*nlines x 3*nbuses)
% b - vetor do lado direito das restricoes de desigualdade (2*nlines)
% Aeq - matriz dos coeficientes das restricoes lineares de igualdade
(nlines x 3*nbuses)
% beq - vetor do lado direito das restricoes de igualdade (nlines)
% lb - limite inferior das variaveis do problema (3*nbuses)
% lu - limite superior das variaveis do problema (3*nbuses)
% -----
% Variaveis de saida:
% x - valores otimos da variaveis do problema
% x(1:nbuses) - angulo de fase das tensoes nodais
% x(nbuses+1:2*nbuses) - injecao (geracao) de potencia nas barras
% x(2*nbuses+1:3*nbuses) - cortes de carga nas barras

```

```

% val - valor da funcao objetivo
% exitflag - segundo funcao interna LINPROG
%   1 LINPROG converged to a solution X
%   0 Maximum number of iterations reached
%  -2 No feasible point found
%  -3 Problem is unbounded
%  -4 NaN value encountered during execution of algorithm
%  -5 Both primal and dual problems are infeasible
%  -7 Search direction became too small; no further progress can be made
% -----
options = optimset('Display','none');

% -----
% determina o numero de barras e de linha do sistema
% -----
nbuses = size(dem,1);
nlines = size(ip,1);
% -----

% -----
% gera o vetor f
% -----
alfa = 10000; % valor do custo associado ao corte de carga
f     = [ zeros(1,2*nbuses), alfa*ones(1,nbuses) ];
% -----

% -----
% Restricoes de igualdade (1a lei de Kirchhoff)
% -----
% Monta a matriz B' do fluxo de carga DC (rede inicial + rede adicionada)
% -----
B = zeros(nbuses,nbuses);
for k = 1:nlines
    k1 = n0(k) + n(k);
    if k1 > 0
        ik      = ip(k);
        jk      = ep(k);
        aux     = -k1/reat(k);
        B(ik,ik) = B(ik,ik) + aux;
        B(jk,jk) = B(jk,jk) + aux;
        B(ik,jk) = B(ik,jk) - aux;
        B(jk,ik) = B(jk,ik) - aux;
    end
end
% -----
% Monta a matriz Aeq (coeficientes das restricoes de igualdade)
% -----
Aeq = [ B -1*eye(nbuses) -1*eye(nbuses) ];
% -----
% Monta o vetor beq (lado direito das restricoes de igualdade)
% -----
beq = -dem;
% -----

% -----
% Restricoes de desigualdade (limites de abertura angular)
% -----
% Estes limites dependem da existencia de linhas, da reatancia e da
% capacidade de cada circuito adicionado.

```

```

% P(ij) = (Theta(i) - Theta(j))/X(ij) => Theta(i) - Theta(j) =
P(ij)*X(ij)
% Pmax(ij)*X(ij) < Theta(i) - Theta(j) < Pmax(ij)*X(ij)
% Theta(i) - Theta(j) < Pmax(ij)*X(ij)
% Theta(j) - Theta(i) < Pmax(ij)*X(ij)
% -----
% Monta a matriz A (coeficientes das restricoes de desigualdade) e o vetor
% b (lado direito das restricoes de desigualdade)
% -----
A = zeros(nlines,3*nbuses);
b = zeros(nlines,1);
for k = 1:nlines
    i      = ip(k);
    j      = ep(k);
    A(k,i) = 1;
    A(k,j) = -1;
    if n0(k) + n(k) == 0
        aux = 1000;
    else
        aux = fmax(k)*reat(k);
    end
    b(k) = aux;
end
A = [ A; -A ];
b = [ b; b ];
% -----

% -----
% Limites nas variaveis do problema
% -----
% Ordem dos limites: limites de angulo de fase das tensoes nodais (-pi,+pi)
% limites de geracao (gmin,gmax) e limites de corte de carga (0,dem)
% -----
lb = [ -pi*ones(nbuses,1); gmin; zeros(nbuses,1) ];
ub = [ pi*ones(nbuses,1); gmax; dem ];
% -----

[x,val,exitflag] = linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb,ub,[],options);

```

Return

ANEXO 4 – SISTEMA SUL – BRASILEIRO (46 BARRAS).

(Santos, 2007)

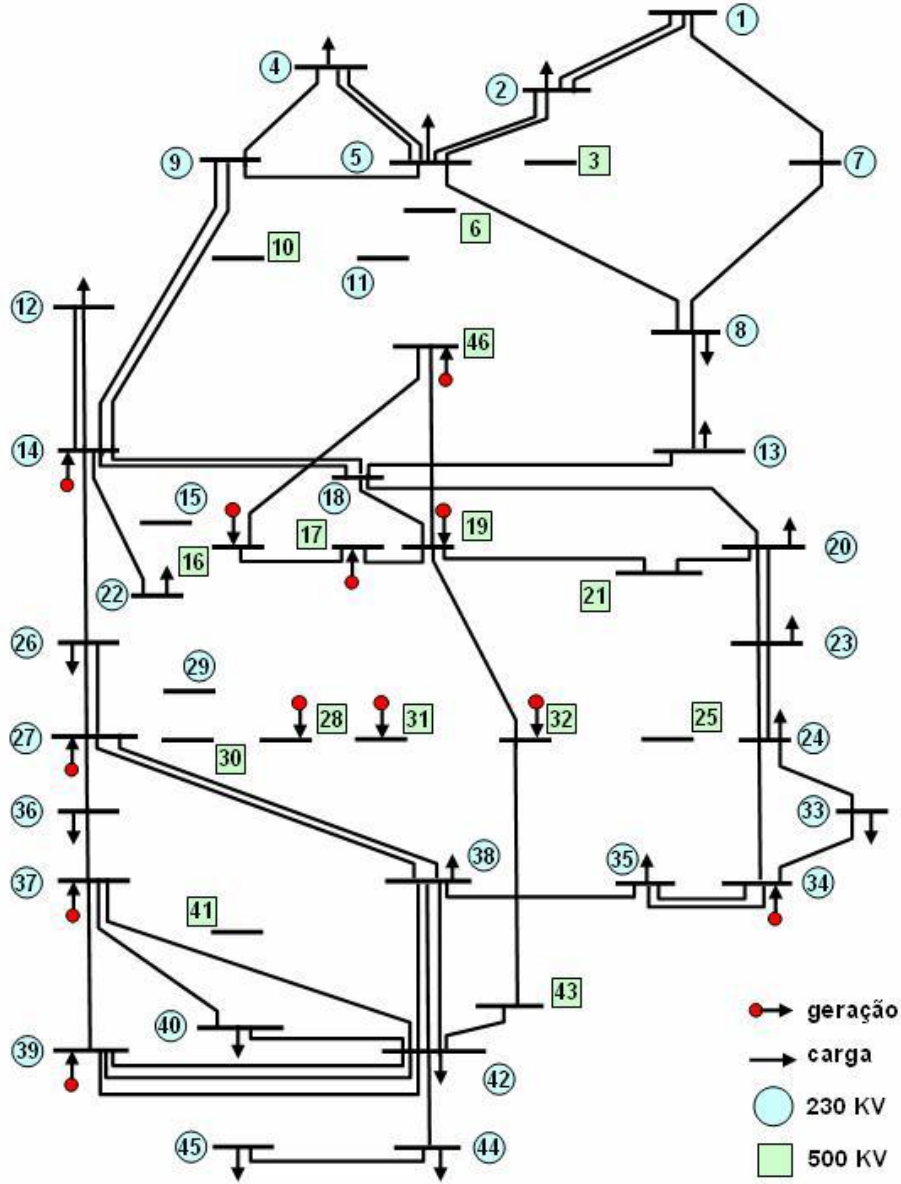


Figura 51. Topologia base do Sistema Sul – Brasileiro.

Tabela 4 – Sistema 46 barras – Dados de linha.

No. Da Linha	Circuito	Linhas Existentes	Reatância (p.u)	Capacidade (MW)	Custo (US\$10 <sup>3</sup> )
1	1 7	1	0.0616	270.0	4349.0
2	1 2	2	0.1065	270.0	7076.0
3	4 9	1	0.0924	270.0	6217.0
4	5 9	1	0.1173	270.0	7732.0
5	5 8	1	0.1132	270.0	7480.0
6	7 8	1	0.1023	270.0	6823.0
7	4 5	2	0.0566	270.0	4046.0
8	2 5	2	0.0324	270.0	2581.0
9	8 13	1	0.1348	240.0	8793.0
10	9 14	2	0.1756	220.0	11267.0
11	12 14	2	0.0740	270.0	5106.0
12	14 18	2	0.1514	240.0	9803.0
13	13 18	1	0.1805	220.0	11570.0
14	13 20	1	0.1073	270.0	7126.0
15	18 20	1	0.1997	200.0	12732.0
16	19 21	1	0.0278	1500.0	32632.0
17	16 17	1	0.0078	2000.0	10505.0
18	17 19	1	0.0061	2000.0	8715.0
19	14 26	1	0.1614	220.0	10409.0
20	14 22	1	0.0840	270.0	5712.0
21	22 26	1	0.0790	270.0	5409.0
22	20 23	2	0.0932	270.0	6268.0
23	23 24	2	0.0774	270.0	5308.0
24	26 27	2	0.0832	270.0	5662.0
25	24 34	1	0.1647	220.0	10611.0
26	24 33	1	0.1448	240.0	9399.0
27	33 34	1	0.1265	270.0	8288.0
28	27 36	1	0.0915	270.0	6167.0
29	27 38	2	0.2080	200.0	13237.0
30	36 37	1	0.1057	270.0	7025.0
31	34 35	2	0.0491	270.0	3591.0
32	35 38	1	0.1980	200.0	12631.0
33	37 39	1	0.0283	270.0	2329.0
34	37 40	1	0.1281	270.0	8389.0
35	37 42	1	0.2105	200.0	13388.0
36	39 42	3	0.2030	200.0	12934.0
37	40 42	1	0.0932	270.0	6268.0

Continuação

38	38	42	3	0.0907	270.0	6116.0
39	32	43	1	0.0309	1400.0	35957.0
40	42	44	1	0.1206	270.0	7934.0
41	44	45	1	0.1864	200.0	11924.0
42	19	32	1	0.0195	1800.0	23423.0
43	46	19	1	0.0222	1800.0	26365.0
44	46	16	1	0.0203	1800.0	24319.0
45	18	19	1	0.0125	600.0	8178.0
46	20	21	1	0.0125	600.0	8178.0
47	42	43	1	0.0125	600.0	8178.0
48	2	4	0	0.0882	270.0	5965.0
49	14	15	0	0.0374	270.0	2884.0
50	46	10	0	0.0081	2000.0	10889.0
51	4	11	0	0.2246	240.0	14247.0
52	5	11	0	0.0915	270.0	6167.0
53	46	6	0	0.0128	2000.0	16005.0
54	46	3	0	0.0203	1800.0	24319.0
55	16	28	0	0.0222	1800.0	26365.0
56	16	32	0	0.0311	1400.0	36213.0
57	17	32	0	0.0232	1700.0	27516.0
58	19	25	0	0.0325	1400.0	37748.0
59	21	25	0	0.0174	2000.0	21121.0
60	25	32	0	0.0319	1400.0	37109.0
61	31	32	0	0.0046	2000.0	7052.0
62	28	31	0	0.0053	2000.0	7819.0
63	28	30	0	0.0058	2000.0	8331.0
64	27	29	0	0.0998	270.0	6672.0
65	26	29	0	0.0541	270.0	3894.0
66	28	41	0	0.0339	1300.0	39283.0
67	28	43	0	0.0406	1200.0	46701.0
68	31	41	0	0.0278	1500.0	32632.0
69	32	41	0	0.0309	1400.0	35957.0
70	41	43	0	0.0139	2000.0	17284.0
71	40	45	0	0.2205	180.0	13994.0
72	15	16	0	0.0125	600.0	8178.0
73	46	11	0	0.0125	600.0	8178.0
74	24	25	0	0.0125	600.0	8178.0
75	29	30	0	0.0125	600.0	8178.0
76	40	41	0	0.0125	600.0	8178.0
77	2	3	0	0.0125	600.0	8178.0
78	5	6	0	0.0125	600.0	8178.0
79	9	10	0	0.0125	600.0	8178.0

Tabela 5 – Sistema 46 barras – Dados de barra.

<b>Barra</b>	<b>Geração</b>	<b>Carga</b>
1	0.0	0.0
2	0.0	443.1
3	0.0	0.0
4	0.0	300.7
5	0.0	238.0
6	0.0	0.0
7	0.0	0.0
8	0.0	72.2
9	0.0	0.0
10	0.0	0.0
11	0.0	0.0
12	0.0	511.9
13	0.0	185.8
14	1.257.0	0.0
15	0.0	0.0
16	2.000.0	0.0
17	1.050.0	0.0
18	0.0	0.0
19	1.670.0	0.0
20	0.0	1.091.2
21	0.0	0.0
22	0.0	81.9
23	0.0	458.1
24	0.0	478.2
25	0.0	0.0
26	0.0	231.9
27	220.0	0.0
28	800.0	0.0
29	0.0	0.0
30	0.0	0.0
31	700.0	0.0
32	500.0	0.0
33	0.0	229.1
34	748.0	0.0
35	0.0	216.0
36	0.0	90.1
37	300.0	0.0
38	0.0	216.0
39	600.0	0.0
40	0.0	262.1
41	0.0	0.0
42	0.0	1.607.9
43	0.0	0.0
44	0.0	79.1
45	0.0	86.700.000
46	70.0	0.0

## ANEXO 5 – SISTEMA DE GARVER.

O sistema proposto por Garver constitui-se de seis barras (SEs) e quinze ramais. Neste sistema foram considerados possíveis os ramais entre quaisquer barras e dois possíveis cenários de geração futura. Para isto este sistema teórico considera a existência de dados obtidos de estudos anteriores para o cálculo da demanda de energia em cada barra, da injeção de energia em cada barra, da localização e quantidade de linhas já construídas, do número máximo de linhas admitidas entre cada par de subestações, da reatância de cada uma dessas linhas, da potência máxima de cada linha e de seus custos de instalação. Estes dados são apresentados nas tabelas de 6 a 9.

**Tabela 6 – Sistema de Transmissão de Garver**

k	m	N <sub>0</sub>	N <sub>max</sub>	R[%]	X[%]	MW <sub>max</sub>	C <sub>inv</sub>
1	2	1	10	0,0	0,40	100,0	40,0
1	3	0	10	0,0	0,38	100,0	38,0
1	4	1	10	0,0	0,60	80,0	60,0
1	5	1	10	0,0	0,20	100,0	20,0
1	6	0	10	0,0	0,68	70,0	68,0
2	3	1	10	0,0	0,20	100,0	20,0
2	4	1	10	0,0	0,40	100,0	40,0
2	5	0	10	0,0	0,31	100,0	31,0
2	6	0	10	0,0	0,30	100,0	30,0
3	4	0	10	0,0	0,59	82,0	59,0
3	5	1	10	0,0	0,20	100,0	20,0
3	6	0	10	0,0	0,48	100,0	48,0
4	5	0	10	0,0	0,63	75,0	63,0
4	6	0	10	0,0	0,30	100,0	30,0
5	6	0	10	0,0	0,61	78,0	61,0

**Tabela 7 – Demanda de Garver**

Barra	Demanda (MW)
1	80
2	240
3	40
4	160
5	240

**Tabela 8 – Geração do Sistema de Garver**

Barra	Mw <sub>min</sub>	Mw <sub>max</sub>
1	0	50
3	0	165
6	0	545

**Tabela 9 – Geração com redespacho do Sistema de Garver**

k	Mw <sub>min</sub>	Mw <sub>Max</sub>
1	0	150
3	0	360
6	0	600

Na Tabela 6 tem-se:

- As colunas dos índices  $k$  e  $m$  referem-se ao número das barras entre as quais existem ou podem ser construídas linhas de transmissão. Esta numeração das barras é escolhida arbitrariamente. O espaço entre as barras é chamado aqui de ramal;



- Na coluna de índice  $N_0$ , é mostrada a quantidade de linhas já presente em cada ramal. Este valor é bem conhecido em qualquer sistema real.
- A coluna de índice  $N_{max}$  apresenta um limite teórico para o número de linhas em cada ramal. Nota-se em geral que, na prática, não há uma limitação para o número de linhas de transmissão em cada ramal. Por isso o valor atribuído a este campo deve ser grande o suficiente para satisfazer qualquer necessidade de instalação de linhas de transmissão.
- As colunas de índice  $R$  e  $X$  apresentam, respectivamente, a resistência e a reatância (características elétricas) de uma única linha de cada ramal. Estes valores são estimados a partir da distância entre as barras e também, conseqüentemente, do nível de tensão da linha. No planejamento dos sistemas de transmissão é comum considerar nula a resistência das linhas de transmissão.
- A coluna de  $MW_{max}$  contém as potências máximas de uma única linha de cada ramal. Este valor é estimado a partir do comprimento do ramal e de suas características elétricas.
- A coluna  $C_{inv}$  apresenta o custo de investimento de uma única linha em cada ramal. Estes valores são uma aproximação do custo real de construção da linha, e são em geral calculados a partir de um valor médio do custo de construção de linhas com as mesmas características.

Na Tabela 7 é apresentada a demanda do sistema em cada barra para um cenário futuro. As Tabelas 8 e 9 mostram a injeção (geração) de energia em cada barra, em dois possíveis cenários futuros. Na Tabela 8, o montante de energia injetada no sistema é igual à demanda. Na Tabela 9, há sobras de energia, o que permite ao método realizar um redespacho de energia no sistema.

Estes dados do sistema de Garver apresentam-se como dados (entradas) do problema da expansão em um estágio. Os valores propostos são semelhantes àqueles encontrados em problemas reais e podem ser alterados para qualquer sistema que se deseje analisar.

Esta topologia inicial do sistema de Garver pode ser visualizada na Figura 52.

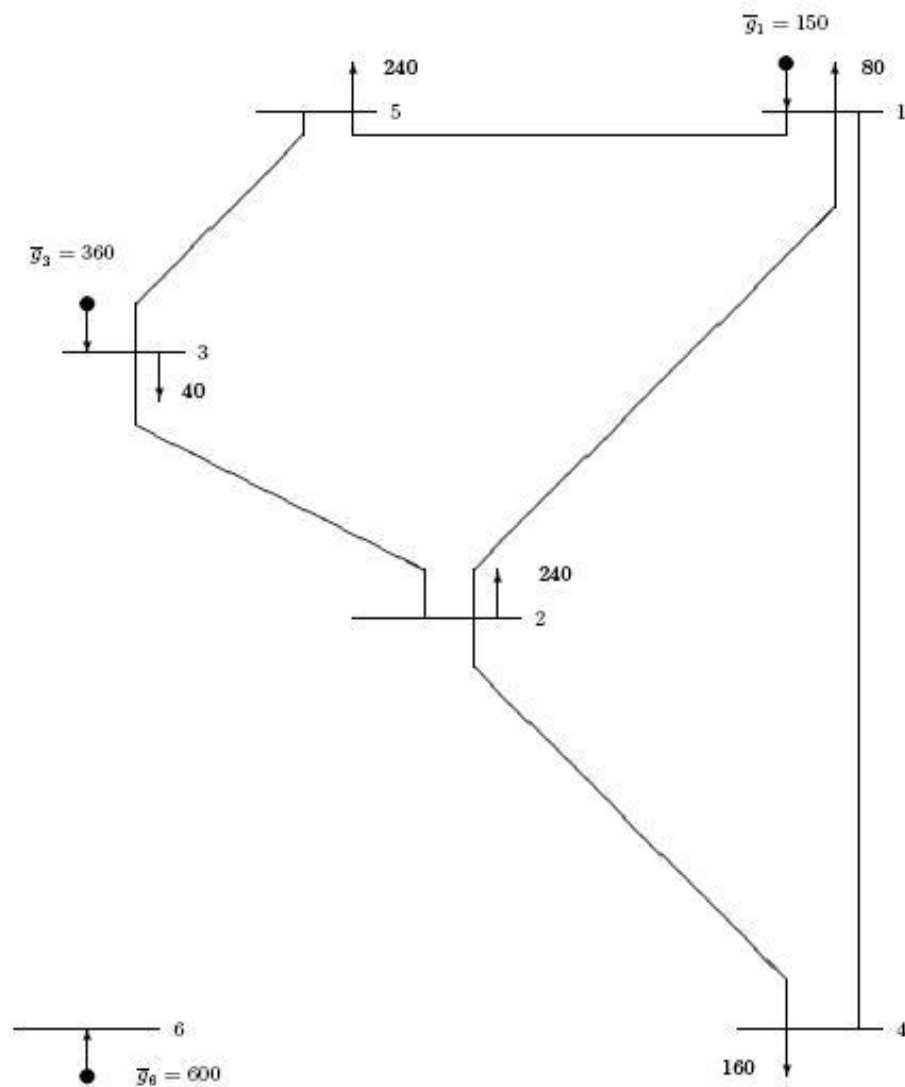


Figura 52. Topologia inicial do Sistema de Garver.

(Santos, 2007)

## ANEXO 6 – SUL\_46\_DAT.M.

```

% -----
% Arquivo com dados do sistema sul - brasileiro de 46 barras e 79 linhas
% -----
% Desenvolvido por SHaffner em maio de 2011
% -----
% Variaveis de saida:
% ip      - barra inicial das linhas/transformadores (nlines)
% ep      - barra final das linhas/transformadores (nlines)
% n0      - numero de linhas/transformadores na configuracao inicial
(nlines)
% nmax    - numero maximo de linhas/transformadores que pode ser
instalado
%                (nlines)
% reat    - reatancia das linhas/transformadores (nlines)
% fmax    - fluxo maximo de potencia ativa nas linhas/transformadores
%                (nlines)
% gmin    - valor minimo de geracao (nbuses)
% gmax    - valor maximo de geracao (nbuses)
% dem     - vetor com a demanda em cada barra (nbuses)
% basemva - base mva do sistema
% -----
%*****
% VALORES SEM REDESPACHO
%          k  MWmin    MWmax
%-----
g1  = [  14    9440    9440
        16   13660   13660
        17   10000   10000
        19    7730    7730
        27     540     540
        28    7300    7300
        31    3100    3100
        32    4500    4500
        34    2210    2210
        37    2120    2120
        39    2210    2210
        46    5990    5990 ];
%*****
% VALORES COM REDESPACHO
%          k  MWmin    MWmax
%-----
g2  =[  14     0    12570
        16     0    20000
        17     0    10500
        19     0    16700
        27     0     2200
        28     0     8000
        31     0     7000
        32     0     5000
        34     0     7480
        37     0     3000
        39     0     6000
        46     0     7000 ];
%*****
%geracao = g1;    % SEM REDESPACHO
geracao = g2;    % COM REDESPACHO
%*****
%DEMANDA_PREVISTA                                5 ITENS

```

```

%-----
%          k  Carga_MW
%-----
demanda = [  2    443.1
            4    300.7
            5    238.0
            8     72.2
           12   511.9
           13   185.8
           20  1091.2
           22    81.9
           23   458.1
           24   478.2
           26   231.9
           33   229.1
           35   216.0
           36    90.1
           38   216.0
           40   262.1
           42  1607.9
           44    79.1
           45    86.7 ];
%-----

```

```

%*****
%DADOS_DAS_LINHAS                                79 ITENS
%-----
%          k   m      NO      Nmax      R[%]      X[%]      MWmax      CInv
%-----
ramos = [  1   7       1       6       0.0       6.16       270.0      4349.0
          1   2       2       6       0.0      10.65       270.0      7076.0
          4   9       1       6       0.0       9.24       270.0      6217.0
          5   9       1       6       0.0      11.73       270.0      7732.0
          5   8       1       6       0.0      11.32       270.0      7480.0
          7   8       1       6       0.0      10.23       270.0      6823.0
          4   5       2       6       0.0       5.66       270.0      4046.0
          2   5       2       6       0.0       3.24       270.0      2581.0
          8  13       1       6       0.0      13.48       240.0      8793.0
          9  14       2       6       0.0      17.56       220.0     11267.0
         12  14       2       6       0.0       7.40       270.0      5106.0
         14  18       2       6       0.0      15.14       240.0      9803.0
         13  18       1       6       0.0      18.05       220.0     11570.0
         13  20       1       6       0.0      10.73       270.0      7126.0
         18  20       1       6       0.0      19.97       200.0     12732.0
         19  21       1       6       0.0       2.78     1500.0     32632.0
         16  17       1       6       0.0       0.78     2000.0     10505.0
         17  19       1       6       0.0       0.61     2000.0      8715.0
         14  26       1       6       0.0      16.14       220.0     10409.0
         14  22       1       6       0.0       8.40       270.0      5712.0
         22  26       1       6       0.0       7.90       270.0      5409.0
         20  23       2       6       0.0       9.32       270.0      6268.0
         23  24       2       6       0.0       7.74       270.0      5308.0
         26  27       2       6       0.0       8.32       270.0      5662.0
         24  34       1       6       0.0      16.47       220.0     10611.0
         24  33       1       6       0.0      14.48       240.0      9399.0
         33  34       1       6       0.0      12.65       270.0      8288.0
         27  36       1       6       0.0       9.15       270.0      6167.0
         27  38       2       6       0.0      20.80       200.0     13237.0
         36  37       1       6       0.0      10.57       270.0      7025.0
         34  35       2       6       0.0       4.91       270.0     3591.0

```

35	38	1	6	0.0	19.80	200.0	12631.0
37	39	1	6	0.0	2.83	270.0	2329.0
37	40	1	6	0.0	12.81	270.0	8389.0
37	42	1	6	0.0	21.05	200.0	13388.0
39	42	3	6	0.0	20.30	200.0	12934.0
40	42	1	6	0.0	9.32	270.0	6268.0
38	42	3	6	0.0	9.07	270.0	6116.0
32	43	1	6	0.0	3.09	1400.0	35957.0
42	44	1	6	0.0	12.06	270.0	7934.0
44	45	1	6	0.0	18.64	200.0	11924.0
19	32	1	6	0.0	1.95	1800.0	23423.0
46	19	1	6	0.0	2.22	1800.0	26365.0
46	16	1	6	0.0	2.03	1800.0	24319.0
18	19	1	6	0.0	1.25	600.0	8178.0
20	21	1	6	0.0	1.25	600.0	8178.0
42	43	1	6	0.0	1.25	600.0	8178.0
2	4	0	6	0.0	8.82	270.0	5965.0
14	15	0	6	0.0	3.74	270.0	2884.0
46	10	0	6	0.0	0.81	2000.0	10889.0
4	11	0	6	0.0	22.46	240.0	14247.0
5	11	0	6	0.0	9.15	270.0	6167.0
46	6	0	6	0.0	1.28	2000.0	16005.0
46	3	0	6	0.0	2.03	1800.0	24319.0
16	28	0	6	0.0	2.22	1800.0	26365.0
16	32	0	6	0.0	3.11	1400.0	36213.0
17	32	0	6	0.0	2.32	1700.0	27516.0
19	25	0	6	0.0	3.25	1400.0	37748.0
21	25	0	6	0.0	1.74	2000.0	21121.0
25	32	0	6	0.0	3.19	1400.0	37109.0
31	32	0	6	0.0	0.46	2000.0	7052.0
28	31	0	6	0.0	0.53	2000.0	7819.0
28	30	0	6	0.0	0.58	2000.0	8331.0
27	29	0	6	0.0	9.98	270.0	6672.0
26	29	0	6	0.0	5.41	270.0	3894.0
28	41	0	6	0.0	3.39	1300.0	39283.0
28	43	0	6	0.0	4.06	1200.0	46701.0
31	41	0	6	0.0	2.78	1500.0	32632.0
32	41	0	6	0.0	3.09	1400.0	35957.0
41	43	0	6	0.0	1.39	2000.0	17284.0
40	45	0	6	0.0	22.05	180.0	13994.0
15	16	0	6	0.0	1.25	600.0	8178.0
46	11	0	6	0.0	1.25	600.0	8178.0
24	25	0	6	0.0	1.25	600.0	8178.0
29	30	0	6	0.0	1.25	600.0	8178.0
40	41	0	6	0.0	1.25	600.0	8178.0
2	3	0	6	0.0	1.25	600.0	8178.0
5	6	0	6	0.0	1.25	600.0	8178.0
9	10	0	6	0.0	1.25	600.0	8178.0

%;\*\*\*\*\*

```

basemva = 100;
nb      = 46;
ip      = ramos(:,1);
ep      = ramos(:,2);
n0      = ramos(:,3);
nmax    = ramos(:,4);
reat    = ramos(:,6);
fmax    = ramos(:,7)/basemva;
cn      = ramos(:,8);
gmin    = zeros(nb,1);
gmax    = zeros(nb,1);

```

```
dem      = zeros (nb,1);

for k=1:size(geracao,1)
    gmin(geracao(k,1)) = geracao(k,2)'/basemva;
    gmax(geracao(k,1)) = geracao(k,3)'/basemva;
end

for k=1:length(demanda)
    dem(demanda(k,1)) = demanda(k,2)/basemva;
end
```

## ANEXO 7 – ILUSTRAÇÃO DA BUSCA DAS ABELHAS POR ALIMENTO NO CAMPO

Inicialmente as abelhas batedoras se distribuem aleatoriamente (Figura 53).

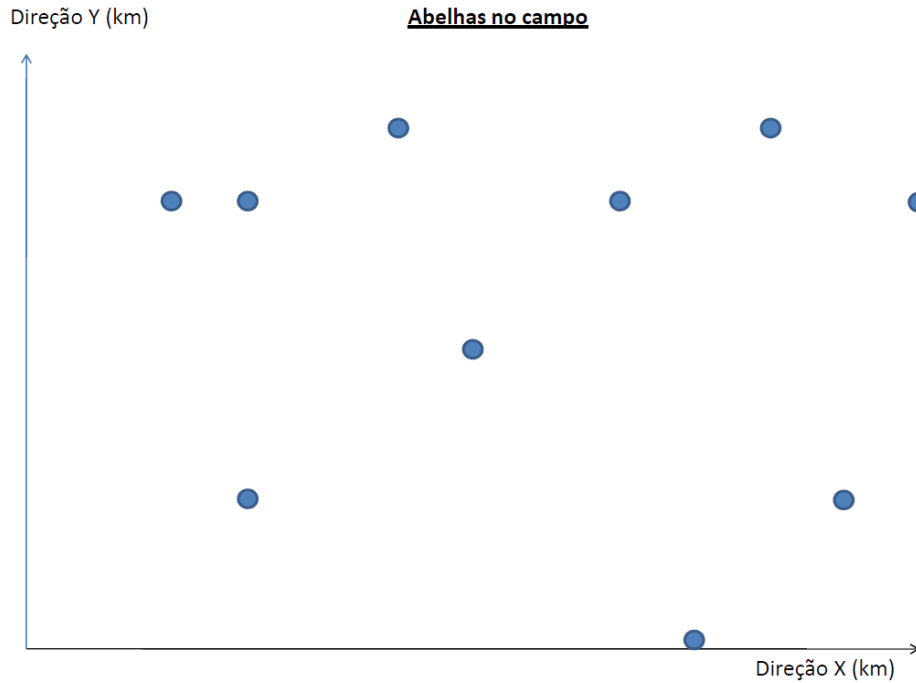


Figura 53. População inicial aleatória.

Inicia-se então o ciclo de buscas por melhores fontes de alimento. Inicialmente as fontes de alimento são classificadas de acordo com a qualidade do néctar local (Figura 54).

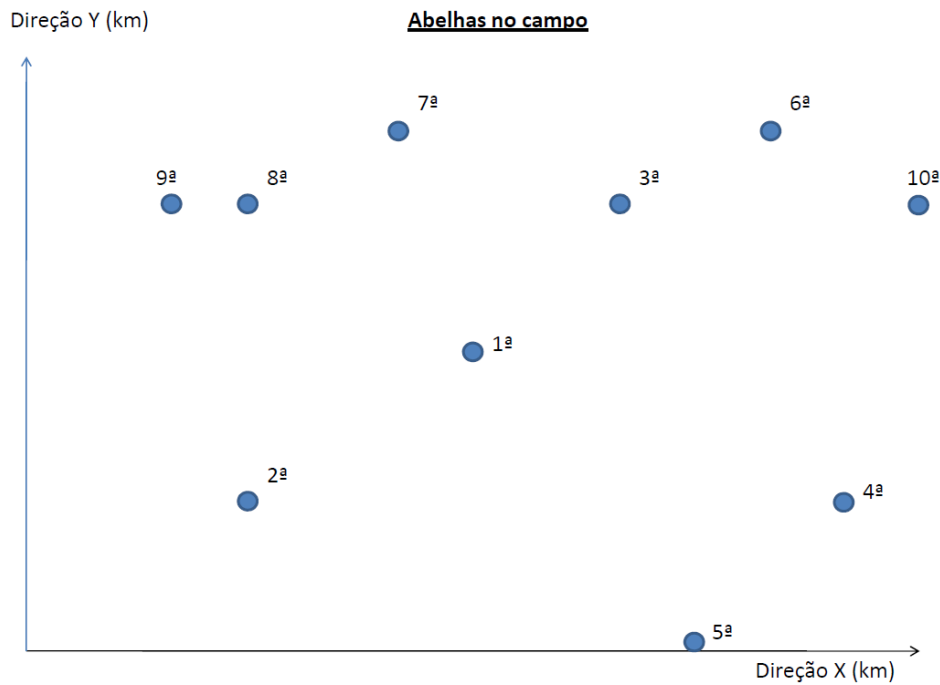


Figura 54. Avaliação da qualidade.

As duas melhores fontes de alimento tem sua vizinhança procurada aleatoriamente por 5 abelhas seguidoras. As 3ª, 4ª e 5ª melhores fontes tem sua vizinhança procurada aleatoriamente por 2 abelhas seguidoras (Figura 55).

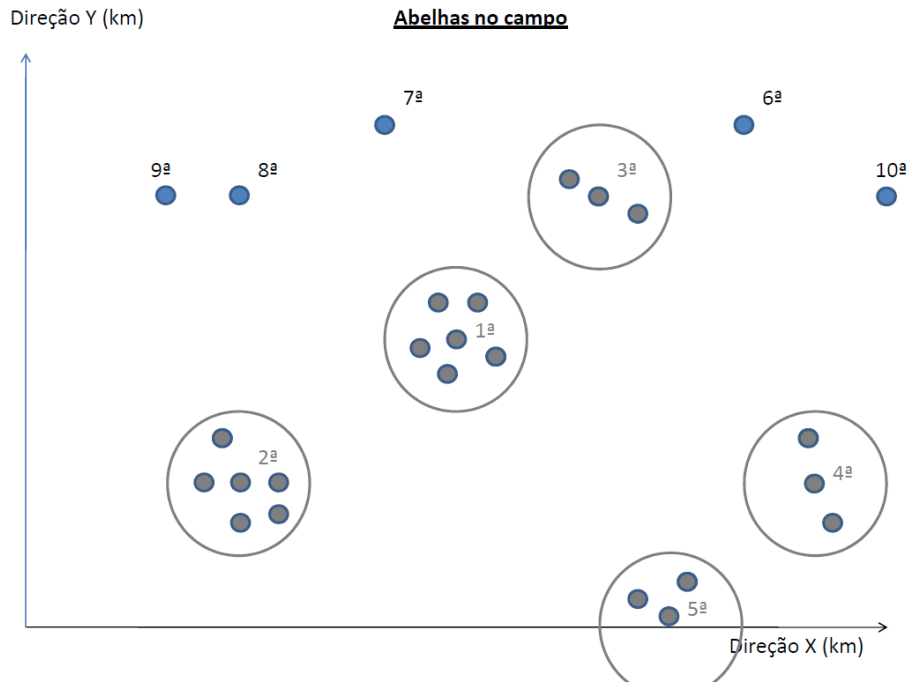


Figura 55. Buscas nas vizinhanças.

A melhor fonte de alimento de cada região é escolhida e as piores são abandonadas (Figura 56).

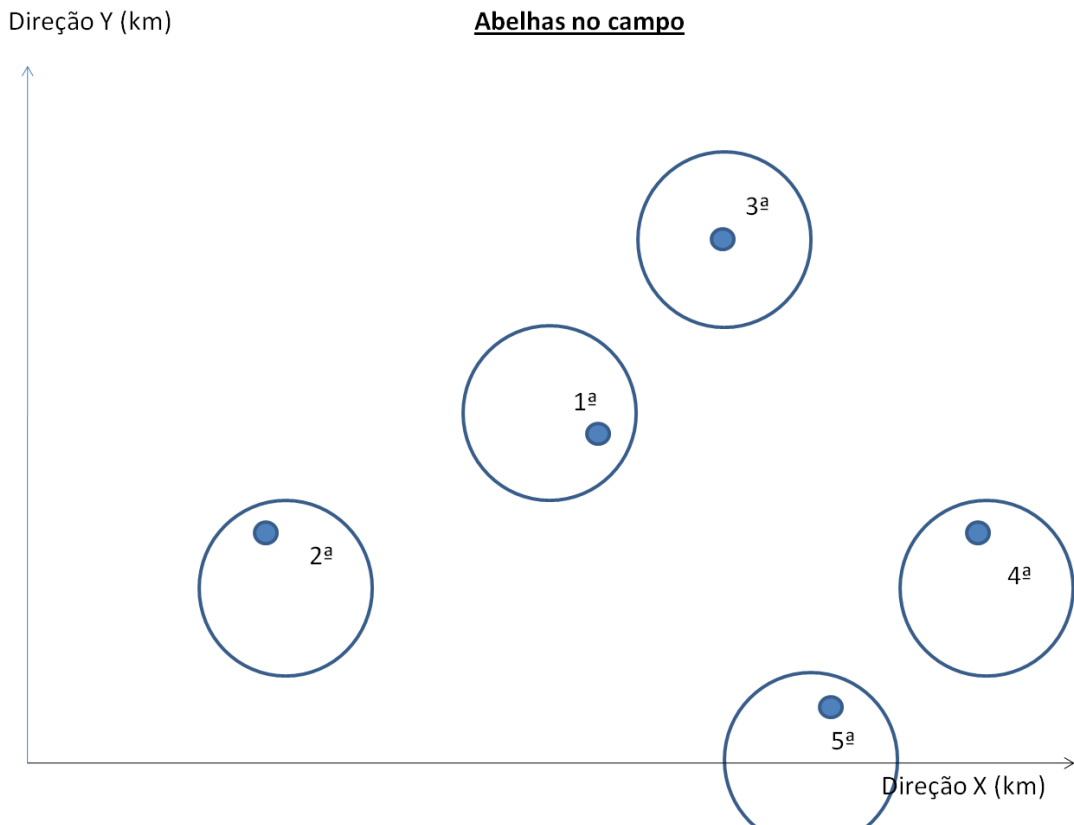


Figura 56. Escolhidas as melhores fontes de cada região e descartadas as outras.



Novas buscas aleatórias são realizadas (Figura 57).

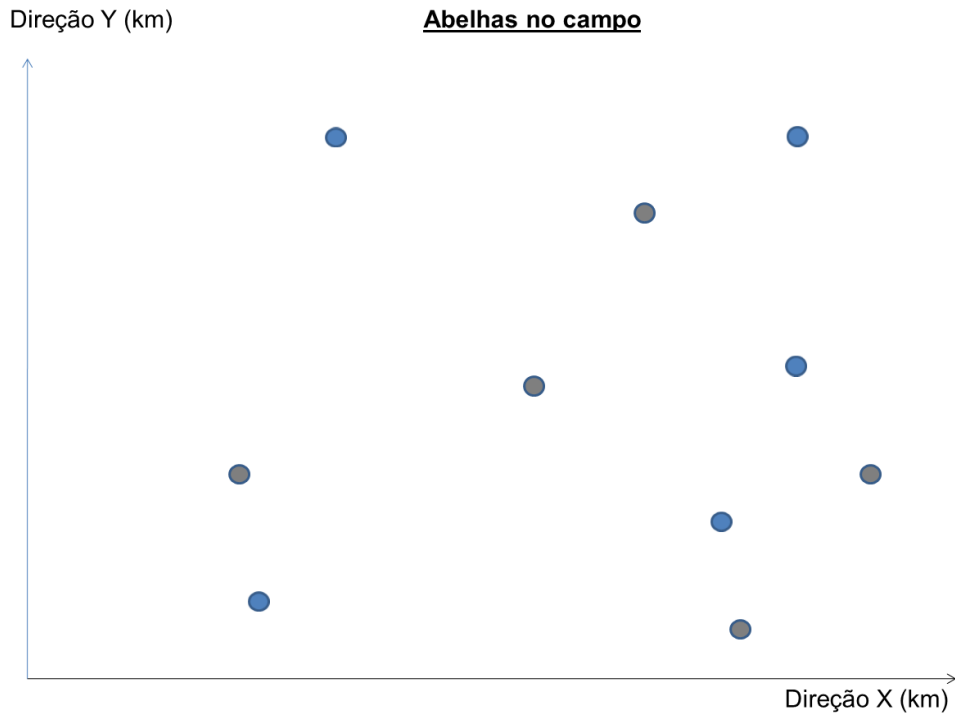


Figura 57. Novas buscas aleatórias.

Este é o fim do ciclo de buscas. A partir daqui, é feita uma nova classificação das fontes de alimento. Seguido por novas buscas na vizinhança das melhores fontes (Figura 58).

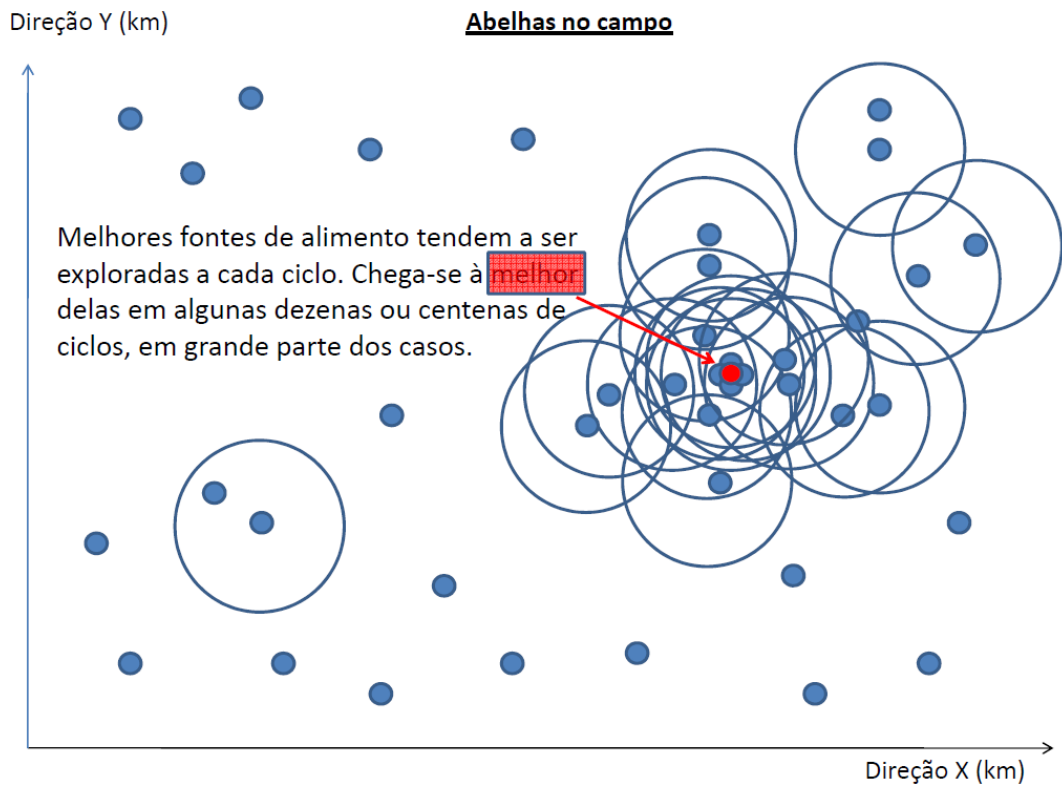


Figura 58. Processo iterativo.