

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ  
CAMPUS DE FOZ DO IGUAÇU  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE SISTEMAS  
DINÂMICOS E ENERGÉTICOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ALGORITMO ESPECIALIZADO APLICADO AO PLANEJAMENTO  
DA EXPANSÃO DE REDES AÉREAS DE SISTEMAS DE  
DISTRIBUIÇÃO**

WILLIAN DOUGLAS FERRARI MENDONÇA

FOZ DO IGUAÇU

2014



Willian Douglas Ferrari Mendonça

**Algoritmo Especializado aplicado ao Planejamento da Expansão de Redes  
Aéreas de Sistemas de Distribuição.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos. Área de concentração: Sistemas Dinâmicos e Energéticos.

Orientador: Carlos Roberto Mendonça da Rocha

Foz do Iguaçu

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca do Campus de Foz do Iguaçu – Unioeste  
Ficha catalográfica elaborada por Miriam Fenner R. Lucas - CRB-9/268

M539 Mendonça, Willian Douglas Ferrari

Algoritmo especializado aplicado ao planejamento da expansão de  
redes aéreas de sistemas de distribuição / Willian Douglas Ferrari  
Mendonça.-- Foz do Iguaçu, 2014.

64p. : il. : tab. : graf.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Mendonça da Rocha.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos - Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

1. Algoritmos computacionais. 2. Sistemas de energia elétrica – Planejamento. 3. Título.

CDU 004.421  
621.315.1

# **Algoritmo Especializado Aplicado ao Planejamento da Expansão de Redes Aéreas de Sistemas de Distribuição**

Willian Douglas Ferrari Mendonça

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos e aprovada pela Banca Examinadora:

Data da defesa pública: 04/07/2014.



---

Prof. Dr. **Carlos Roberto Mendonça da Rocha** - (Orientador)  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE



---

Prof. Dr. **Hugo Andrés Ruiz Florez**  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR



---

Prof. Dr. **Edgar Manuel Carreño Franco**  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE



# Resumo

No presente trabalho é apresentado o desenvolvimento de um algoritmo especializado para o planejamento da expansão de redes aéreas de sistemas de distribuição. A técnica utilizada para solução é a Heurística Construtiva que tem sido utilizada em conjunto com modelos matemáticos de otimização para resolver o problema. No entanto o algoritmo apresentado não emprega um modelo matemático de otimização, em outras palavras, um modelo composto de função objetivo e restrições. Assim, em vez de trabalhar com variáveis, procura-se trabalhar com parâmetros, com o objetivo de proporcionar uma maior velocidade ao processo de pesquisa, simplificando o processo de busca para a topologia final sempre buscando manter o compromisso de encontrar uma solução de boa qualidade. Apesar de não ter a garantia de que a solução seja a ótima global, as soluções obtidas por este tipo de algoritmo são quase sempre soluções de excelente qualidade e podem ser usadas como ponto de partida para os algoritmos que usam técnicas ou modelos matemáticos mais complexos. Para auxiliar o Algoritmo Heurístico Construtivo na busca para a topologia final é usada uma rotina especializada para o cálculo do fluxo de potência CA. A metodologia utilizada pela subrotina para estes cálculos está baseada no algoritmo de varredura *Backward Forward Sweep*.

Palavras-chave: Algoritmos Heurísticos, Linhas de Sistemas de Distribuição, Análise Computacional de Sistemas de Potência, Planejamento de Sistemas de Potência.

# Abstract

In this Master's Dissertation is presented the development of a specialized algorithm for planning the expansion of pole networks of distribution systems. The technique used for solution is the Constructive Heuristics that has been used together with mathematical optimization models to solve the problem. However the presented algorithm does not employ a mathematical optimization model, in other words, a model compound of objective function and constraints. So, instead of working with variables, we seek to work with parameters, with the objective of providing greater speed to the research process, simplifying the search process for the final topology always keeping committed to finding a solution of good quality. Despite not having a guarantee that the solution is the global optimum, the solutions obtained by this type of algorithm solutions are almost always of excellent quality and can be used as a starting point for algorithms that use techniques or more complex mathematical models. To assist the Constructive Heuristic Algorithm in the search for the final topology is used a specialized routine for the calculation of AC power flow The methodology used by the subroutine for these calculations is based on the Backward Forward Sweep algorithm.

**Keywords:** Constructive heuristics, Distribution Systems, Computational Analysis in Power System, Power System Planning.

Aos meus Pais.

À minha namorada.

"Sempre e nunca são palavras que você sempre deve lembrar e nunca usá-las. "

Autor: Wendell Johnson



# Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, Gisneida Ferrari de Mendonça e Juarez Alves de Mendonça por todo o apoio ao longo dessa caminhada e a Deus por me dar força em todos os momentos.

Aos meus colegas de mestrado que ao longo dessa caminhada se tornaram grandes amigos e sem eles não seria possível chegar até onde cheguei: Katiani Perreira, Marcos Ricador Muller e Rodrigo Delfim Guarizi.

À minha namorada Cláudia Vanessa Robl por todo seu apoio ao longo do trabalho e também por sua paciência ao longo dessa caminhada.

Ao Prof. Dr. Carlos Roberto Mendonça da Rocha que me orientou durante todo o trabalho e sem ele não seria possível chegar até onde cheguei.

À todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos- PGESDE.

Ao apoio financeiro da Fundação Parque Tecnológico Itaipu – FPTI – e da Fundação Araucária em parceria com Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – pelas bolsas de pesquisa concedidas durante o tempo da pesquisa.



# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 O Problema.....	3
1.2 Objetivos .....	5
1.2.1 Objetivo Geral .....	5
1.2.2 Objetivos Específicos .....	5
1.3 Estrutura do Trabalho.....	6
<b>2 Algoritmo Heurístico Construtivo</b>	<b>7</b>
2.1 Introdução.....	7
2.2 Algoritmo Heurístico Construtivo.....	9
2.3 Revisão Bibliográfica.....	11
2.4 Considerações Finais do Capítulo .....	13
<b>3 Método <i>Backward Forward Sweep</i></b>	<b>15</b>
3.1 Introdução.....	15
3.2 Revisão Bibliográfica.....	15
3.3 <i>Backward Forward Sweep</i> .....	16
3.3.1 Formulação do Método.....	18
3.4 Considerações Finais do Capítulo .....	20
<b>4 Algoritmo AHC Especializado</b>	<b>21</b>
4.1 Introdução.....	21
4.2 AHC Especializado .....	21
4.2.1 Indicador de Sensibilidade.....	23
4.3 Exemplo AHC Especializado.....	26
4.3.1 Subrotina <i>Backward Forward Sweep</i> .....	30

4.4	Considerações Finais do Capítulo.....	32
<b>5</b>	<b>Testes e Resultados</b>	<b>33</b>
5.1	Introdução .....	33
5.2	Sistema 23 barras .....	33
5.3	Resultados para o sistema de 23 barras .....	36
5.3.1	IS sem perdas .....	37
5.3.2	IS com perdas.....	40
5.4	Sistema 32 Barras .....	45
5.5	Resultados para o sistema de 32 barras .....	48
5.5.1	IS sem perdas .....	48
5.5.2	IS com perdas.....	52
5.6	Considerações Finais do Capítulo.....	57
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>59</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>61</b>

# Lista de Figuras

Figura 1.1: Organização da Dissertação.....	6
Figura 2.1: Pseudocódigo Genérico do AHC.....	10
Figura 3.1: <i>Backward Sweep</i> .....	17
Figura 3.2: <i>Fordward Sweep</i> .....	17
Figura 4.1: Fluxograma AHC especializado.....	25
Figura 4.2: Sistema Exemplo.....	26
Figura 4.3: Primeira Iteração linhas Candidatas.....	27
Figura 4.4: Primeira Iteração linhas construídas.....	27
Figura 4.5: Segunda Iteração linhas Candidatas.....	28
Figura 4.6: Segunda Iteração linhas construídas.....	28
Figura 4.7: Terceira Iteração linhas Candidatas.....	29
Figura 4.8: Terceira Iteração linhas Construídas.....	29
Figura 4.9: Numeração dos Ramos.....	30
Figura 4.10: Fluxograma do Algoritmo da subrotina BFS.....	31
Figura 5.1: Sistema 23 Barras – Conexão de Linhas Candidatas.....	34
Figura 5.2: Configuração Final 23 Barras IS sem perda.....	39
Figura 5.3 Gráfico de investimentos.....	40
Figura 5.4 Configuração final 23 barras com perda.....	42
Figura 5.5 Gráfico Investimentos.....	45
Figura 5.6 Sistema 32 Barras – Conexão de Linhas Candidatas.....	46
Figura 5.7 Configuração Final IS sem perdas.....	51
Figura 5.8 Gráfico de investimentos.....	52
Figura 5.9 Configuração Final do Sistema.....	54
Figura 5.10 Gráfico Investimentos.....	57



# Lista de Tabelas

Tabela 5.1 Dados dos Barramentos.....	35
Tabela 5.2 Dados dos Tipos de Condutores Disponíveis.....	35
Tabela 5.3 Dados das Linhas .....	36
Tabela 5.4 Resultados do Processo Iterativo.....	37
Tabela 5.5 Comparação com Resultados de outros Algoritmos .....	40
Tabela 5.6 Resultado do Processo Iterativo .....	43
Tabela 5.7 Dados dos Barramentos.....	47
Tabela 5.8 Dados das Linhas .....	47
Tabela 5.9 Resultados do Processo Iterativo.....	49
Tabela 5.10 Resultado Processo Iterativo .....	55



# Lista de Símbolos

$AHC$	Algoritmo Heurístico Construtivo
$AHCs$	Algoritmos Heurísticos Construtivos
$BFS$	<i>Backward-Forward Sweep</i>
$IS$	Indicador de sensibilidade
$IEE$	Indústria de Energia Elétrica
$SEP$	Sistema Elétrico de Potência
$PESD$	Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição
$PNLIM$	Programação Não-Linear Inteiro Misto
$PNL$	Programação Não-Linear
$I_k$	Corrente na barra $k$
$S_k$	Potência Aparente (carga) na barra $k$
$NB$	Número total de barras
$V_k$	Tensão na barra $k$
$I_{km}$	Corrente no ramo entre as barras $k$ e $m$
$I_m$	Corrente na barra $m$
$Fm$	Conjunto das barras alimentadas pela barra $m$
$V_m$	Tensão na barra $m$
$Z_{km}$	Impedância do ramo entre as barras $k$ e $m$
$Saux_k$	Potência calculada através dos dados do fluxo de potência CA
$\Delta S_k$	Valor da variação de potências
$V_k$	Valor de tensão estabelecida no processo <i>Backward Sweep</i>
$Vaux_k$	Valor de tensão estabelecida no processo <i>Forward Sweep</i>

xviii

$\Delta V_k$  Valor da variação das tensões

# Capítulo 1

## Introdução

A busca pelo bem estar, conforto e desenvolvimento, pela sociedade, tornou-a extremamente dependente do uso de energia elétrica. Este bem estar pode ser contextualizado quando pedestres se deslocam por vias públicas bem iluminadas durante a noite, quando a família obtém o conforto térmico em dias de calor ou de frio, ou generalizando, quando o produtor industrial e o comerciante conseguem exercer suas atividades, que não poderiam ser realizadas sem o recurso da energia elétrica de forma satisfatória. De forma pragmática, quem propicia este conforto, bem estar e desenvolvimento para a sociedade é a Indústria de Energia Elétrica (IEE). A IEE pode ser considerada como a composição de diversos setores que se estendem desde as diversas usinas de geração, com capacidade de utilizar energias primárias de diversas fontes para a produção da energia elétrica, passando pelas redes elétricas que compõem os sistemas de transmissão e distribuição, os consumidores, os sistemas de serviços e a sua complexa forma de regulamentação.

O marco inicial para o desenvolvimento da IEE pode ser creditada na conta do alemão Werner Von Siemens (Siemens 2014), inventor do dínamo para a indústria, que com o feito, realizado em 1867, permitiu que a sociedade pudesse sonhar com as possibilidades de utilização industrial da energia elétrica. Nos Estados Unidos da América, no início da década de 1880, muitas empresas foram formadas - e foram instalados geradores que tinham como fonte primária o movimento das águas - para o controle e iluminação das vias públicas. De acordo com (Casazza and Delea 2003) esta foi a primeira aplicação real de eletricidade. Em 1882, Thomas Edison colocou em operação a usina termoeletrica de Pearl Street e o pioneiro sistema de distribuição de energia elétrica em corrente contínua para o fornecimento de energia elétrica para os escritórios de negócios da cidade de Nova Iorque (Rustelbakke 1983). Ainda de acordo com (Rustelbakke 1983), a primeira linha de transmissão foi construída na Alemanha e operava em 2,4 kV em corrente contínua cobrindo uma distância de 59 km. Com o tempo, os motores elétricos foram sendo desenvolvidos e o uso das lâmpadas elétricas foi se

incrementando cada vez mais, até que em 1886 os sistemas desenvolvidos em corrente contínua enfrentaram a sua primeira limitação: o problema da queda de tensão (as empresas podiam fornecer a energia elétrica somente a poucas distâncias da usina geradora e os valores da tensão elétrica não podiam ser incrementados e nem diminuídos). Assim, a solução prática comercial para a época foi o desenvolvimento do transformador em 1885, que permitiu o desenvolvimento do sistema em corrente alternada. A primeira linha de transmissão em corrente alternada trifásica construída nos Estados Unidos da América foi instalada em 1893 na Califórnia (Rustelbakke 1983; Casazza and Delea 2003), com tensão de 2,3 kV e um comprimento de 12,7 km. Ainda de acordo com (Rustelbakke 1983; Casazza and Delea 2003), um pouco antes, em 1891, entrava em operação uma linha trifásica com tensão de 12 kV e um comprimento de 180 km, e pouco tempo depois, em 1903, uma linha de transmissão com tensão de 60 kV foi energizada no México.

Todo este desenvolvimento da IEE estava sendo acompanhado de perto pelo Brasil. Este processo se deu graças ao interesse científico que havia em D. Pedro II, e que segundo (Bastos 2008) era um grande entusiasta das novas invenções. Segundo (Marcolin 2005), a cronologia de alguns fatos mostra bem esta simultaneidade no uso da eletricidade. Um destes fatos seria a inauguração da iluminação na Estação Central da Estrada de Ferro D. Pedro II (depois chamada de Central do Brasil), no Rio de Janeiro, no mesmo ano que Thomas Edison havia inventado a lâmpada elétrica (1879), a iluminação pública do então distrito de Campos (Campos dos Goytacazes) no Rio de Janeiro em 1883 (Marcolin 2005; Silva 2006) um ano após este serviço ser prestado em Nova Iorque, e ainda neste mesmo ano, a entrada em operação da pequena usina de Ribeirão do Inferno (onde ainda se computa a construção da primeira linha de transmissão do Brasil) (Moreira 2014). Porém, a primeira usina hidrelétrica que foi considerada construída no Brasil e na América Latina, por seu porte, foi a usina de Marmelos em 1889 (Marcolin 2005). Esta usina foi considerada um marco no desenvolvimento da IEE no Brasil, fornecendo a energia elétrica em sistema de corrente alternada para a iluminação pública da cidade de Juiz de Fora (Levy 2003).

Para a IEE, um Sistema Elétrico de Potência (SEP) é considerado o seu instrumento viabilizador, caracterizando as diversas formas de energia primária necessárias para a geração de energia elétrica como a sua matéria prima.

De acordo com a norma NR10 (“NR10 - Segurança Em Instalações E Serviços Em Eletricidade” 2004), um SEP é definido como o conjunto de instalações e equipamentos destinados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica até a medição, inclusive.

A sua função pode ser sintetizada no fornecimento de energia elétrica pronta, em sua forma de utilização, para os consumidores.

No SEP do Brasil, quase toda energia elétrica que é produzida para o consumo é gerada longe dos centros consumidores e é transportada por muitos quilômetros até estes centros. A transmissão e a distribuição desta energia produzida é uma tarefa que é desempenhada graças a presença de muitas, milhares, linhas de transmissão e de distribuição, subestações, e outros milhares de equipamentos como os transformadores de potência, entre outros, que interligados, permitem que a energia elétrica que é produzida chegue a todos os seus consumidores. Contudo, um sistema deste é um sistema de grande porte e para manter seu funcionamento, de maneira com que a energia elétrica chegue a todos os seus consumidores com boa qualidade é necessário um planejamento.

De acordo com (Sampaio 2014), planejamento é um processo contínuo e dinâmico que consiste em um conjunto de ações intencionais, integradas, coordenadas e orientadas para tornar realidade um objetivo futuro, de forma a possibilitar a tomada de decisões antecipadamente considerando aspectos como o prazo, custos, qualidade, segurança, desempenho e outras condicionantes. Em (Henderson 2014), o autor afirma que em muitas comunidades cada vez mais as pessoas estão se perguntando: Onde você estava quando aconteceu o *Blackout*? Estas interrupções de fornecimento de energia podem estar relacionadas com desastres ambientais como tormentas, tempestades, terremotos ou com problemas decorrentes de falhas de projeto, operações incorretas de equipamentos ou ainda erros de planos de operação e de planejamento. Assim, a área de planejamento de sistemas elétricos é fundamental para a sociedade. Ainda segundo (Henderson 2014), a eletricidade é a alma de qualquer sociedade e que, considerando entre o pior a melhor das hipóteses, a perda generalizada de eletricidade interrompe a economia e perturba a rotina diária das pessoas e no pior dos casos, que está se tornando cada vez mais comum, esta perda pode resultar na perda de vidas e agravar as consequências das catástrofes naturais.

## 1.1 O Problema

O processo de Planejamento de Sistemas Elétricos de Potência é extremamente complexo e não pode ser resolvido sem que sejam feitas simplificações. Neste sentido, o SEP pode ser decomposto, considerando as suas características funcionais, em Sistemas de

Geração, de Transmissão, de Distribuição e de Comercialização. Como uma metodologia para resolver o problema de Planejamento de Sistemas Elétricos de Potência, este planejamento costuma ser dividido entre os seus principais agentes: Planejamento de Sistemas de Geração, de Transmissão e de Distribuição. A área de pesquisa deste trabalho está vinculada ao problema do Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição (PESD).

As redes de distribuição são as responsáveis por permitir que a energia elétrica produzida pelos Sistemas de Geração, que é transportada até as subestações de distribuição através dos Sistemas de Transmissão, flua das subestações para as indústrias, para o comércio e para as residências. Estas redes são estabelecidas para o atendimento da demanda por energia elétrica. Porém, devido a limitações técnicas, em vários períodos existe a necessidade de expandi-la, para que seus usuários possam ser atendidos da melhor maneira possível. Assim, a solução do problema relacionado com esta pesquisa consiste na determinação da capacidade e da localização dos novos equipamentos e instalações para a rede de distribuição e que são necessários para o atendimento da demanda futura levando em consideração a capacidade, as quedas de tensão do sistema e a segurança (Willis 2004).

O PESD busca a solução para o atendimento das demandas considerando leis físicas (restrições operacionais) e restrições econômicas. De acordo com (Khator and Leung 1997) os modelos de otimização empregados para solucionar este problema, de uma forma geral, podem ser elencados nas seguintes categorias: (I) Modelos para Alimentadores Individuais, (II) Modelos para um Sistema de Alimentadores, (III) Modelos Duas Fases, (IV) Modelos Subestação-Alimentadores.

Dentro deste assunto, quanto mais exato for o modelo, mais difícil é a sua solução. Assim, existem boas aproximações para os modelos matemáticos empregados no PESD que utilizam programação linear para sua solução, e representações que necessitam um maior esforço computacional, utilizando-se, por exemplo, a programação não linear ou então a programação inteira mista.

Este trabalho apresenta um novo algoritmo para resolver o problema PESD. Diferente de outros algoritmos, ele não emprega um modelo matemático de otimização, ou seja, um modelo composto por função objetivo e restrições, para a solução do problema. Para resolver o problema o algoritmo emprega uma técnica de solução já bastante conhecida na literatura especializada, conhecida como Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC), porém a principal diferença entre os Algoritmos Heurísticos Construtivos (AHCs) já conhecidos e o apresentado, está no fato de que os elementos utilizados para o cálculo do indicador de

sensibilidade não provém da solução de um modelo matemático de otimização, mas sim de alguns parâmetros que são calculados através de dados iniciais do sistema, e de outros, que são determinados por uma rotina que resolve o fluxo de carga CA através do Método de *Backward-Forward Sweep* (BFS) (Shirmohammadi et al. 1988).

Levando-se em consideração a classificação estabelecida em (Khator and Leung 1997), o algoritmo, apesar de não usar um modelo de otimização, mas assim como os modelos enquadrados em (II), considera uma rede com subestações com pontos de demanda e pontos de fornecimento, e o objetivo é determinar um caminho para conectar as subestações com os pontos de demanda, com um mínimo custo de construção possível.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Estabelecer e implementar um novo algoritmo, especializado, para resolver o problema PESD, sem a utilização de modelagem matemática, e que possua desempenho computacional similar ou melhor do que técnicas de otimização para encontrar uma solução para o problema.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Analisar os Algoritmos Heurísticos Construtivos e suas aplicações para o problema PESD;
- Analisar o Método *Backward-Forward Sweep* para o cálculo de fluxo de potência CA em redes radiais de sistemas de distribuição de energia elétrica;
- Pesquisar sobre a linguagem GAMS;
- Estabelecer e implementar o novo algoritmo;
- Realizar Testes Computacionais com o novo algoritmo.
- Avaliar o desempenho do algoritmo.

### 1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos. Neste primeiro capítulo foi feita uma introdução ao assunto onde se procurou trazer algumas informações históricas e contextualizar a importância da área de planejamento de sistemas elétricos para a sociedade. Ainda neste capítulo, definiu-se o problema a ser abordado nesta pesquisa assim como o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho.

No Capítulo 2 são apresentadas as principais características e uma revisão bibliográfica sobre AHCs. No próximo capítulo são apresentadas as principais características e a forma de operar do Método *Backward-Forward Sweep* para a determinação do cálculo do fluxo de potência CA em redes radiais de sistemas de distribuição de energia elétrica.

No Capítulo 4 é apresentada a proposta do algoritmo especializado, inspirada na técnica de solução AHC e no Método *Backward-Forward Sweep*, para resolver o PESD. No capítulo seguinte são apresentados os testes e resultados obtidos através da simulação dos algoritmos e uma análise destes resultados.

No Capítulo 6, apresentam-se as conclusões e as análises finais com as sugestões para trabalhos futuros.

A Figura 1.1 apresenta o esquema para o desenvolvimento do trabalho.

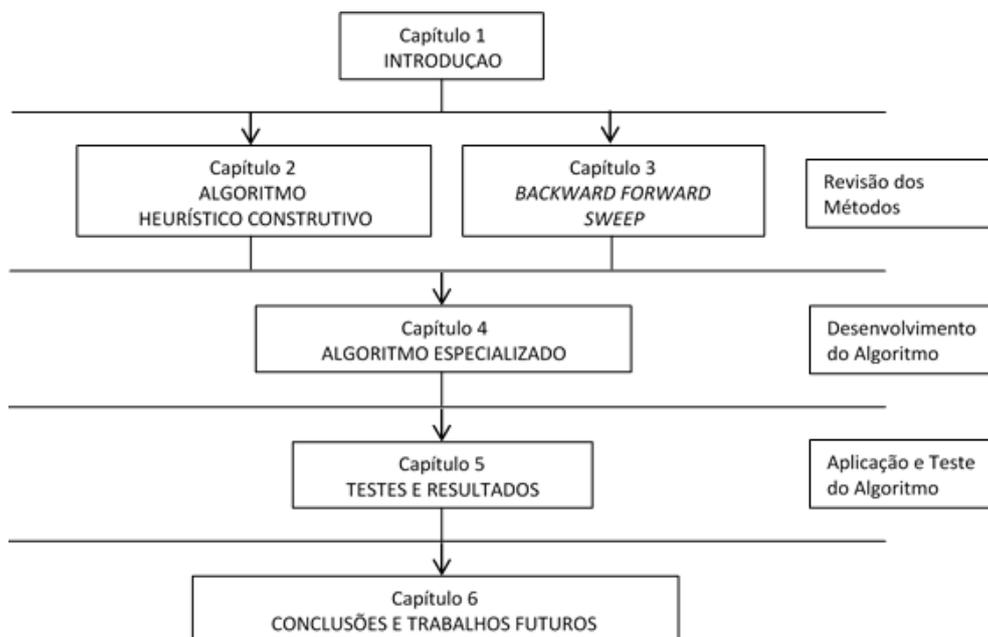


Figura 1.1: Organização da Dissertação

# Capítulo 2

## Algoritmo Heurístico Construtivo

### 2.1 Introdução

A palavra heurística vem do grego *heuriskein* (descobrir), que também é a origem da palavra *heureka* que foi imortalizada pelo filósofo grego Arquimedes. (Rich and Knight 1993).

Heurística é um método que busca apontar para pontos interessantes - como um guia de turismo - entretanto, “pontos interessantes” podem ficar de fora da sua rota. Assim, ao contrário de métodos exatos, um método heurístico usualmente é baseado a partir de regras pré-estabelecidas por um especialista.

Os métodos heurísticos englobam estratégias, procedimentos e métodos aproximativos com o objetivo de encontrar uma boa solução, mesmo que não seja a ótima, em um tempo computacional razoável.

Existem fatores que podem tornar interessante à utilização de algoritmos heurísticos na resolução de um determinado problema:

- (1) Na utilização como passo inicial ou dado de entrada para outros algoritmos, potencialmente exatos ou heurísticos (o seu resultado seria tratado com um dado de entrada).
- (2) Quando a resolução de um problema de forma real for complexa ou não exista resolução exata (chegar próximo de uma solução ótima é extremamente válido).
- (3) Quando não é necessário a solução ótima porque o problema pode sofrer várias alterações a todo momento (uma solução intermediária é válida).
- (4) Quando a quantidade de dados não é a necessária.

- (5) Quando é necessário que o resultado seja calculado de forma rápida, ou seja, há restrições de tempo e dinheiro.
- (6) Quando não existe um método exato para a resolução deste problema ou o mesmo requer um tempo muito alto de processamento (uma solução boa é melhor do que não ter nenhuma solução).
- (7) Quando não é necessária a solução ótima (as soluções obtidas já são razoáveis).
- (8) Quando os dados são pouco confiáveis (a busca pela solução ótima não tem sentido, pois a mesma será uma aproximação da realidade).

Em consideração a estes fatores, para o problema abordado no PESD os fatores (1), (2), (5) e (6) têm relevância, sobretudo na forma para o tratamento dos resultados obtidos com a busca da solução. Neste assunto, o tamanho do problema a ser resolvido, o modelo matemático para representar o problema, a consideração de restrições não lineares, tempos de processamento proibitivos, tudo isto pode interferir na maneira que se busca para resolver o problema, e um algoritmo heurístico pode se tornar atrativo para o processo de busca da solução.

Para a busca de solução do PESD, uma variada gama de técnicas de solução são aplicadas, utilizando-se métodos de otimização clássica ou técnicas de programação matemática e métodos heurísticos.

O primeiro trabalho relevante aplicado ao problema de PESD foi (Knight 1960). Foi através desse trabalho que se propôs a utilização de programação inteira mista para resolver o problema de PESD. No decorrer dos próximos anos, novas publicações relacionadas com resultados de novos trabalhos nesta área apareceram, e muitos destes trabalhos foram analisados por (VAZIRI, TOMSOVIC, and GÖNEN 2000).

Considerando-se os métodos de programação matemática, a função objetivo que, em geral, deve ser minimizada, é a representação do valor presente dos custos totais de instalação de equipamentos, de operação e de manutenção da rede, e as restrições geralmente se referem aos efeitos físicos que devem ser considerados pelo modelo e às restrições relacionadas com a capacidade dos equipamentos. Entre estes métodos, destacam-se aqueles apresentados por (Vaziri, Tomsovic, and Bose 2004; Paiva et al. 2005).

Desde a década de 80 do século passado, muita pesquisa foi investida na busca da solução do PESD com a utilização de algoritmos heurísticos, que acabaram por se tornar uma alternativa em relação aos métodos de programação matemática. Apesar do fato de que os algoritmos heurísticos não têm a capacidade, pelo menos do ponto de vista teórico, de encontrar a solução ótima global de um problema complexo, eles geralmente são simples de entender e de implementar computacionalmente. Este fato tem feito com que os métodos heurísticos ganhassem espaço e campo para pesquisas.

Entre os algoritmos heurísticos destacam-se os algoritmos denominados *branch exchange* (Miguez et al. 2002), colônia de formigas (Gomez et al. 2004), *simulated annealing* (Nahman and Peric 2008), busca tabu (Ramírez-rosado and Domínguez-navarro 2006), algoritmo genético (Najafi et al. 2009), e os algoritmos heurísticos construtivos (Lavorato et al. 2010).

Para as pesquisas que empregam a otimização para a busca da solução, há a necessidade de um modelo matemático para a representação do problema. Alguns modelos matemáticos desenvolvidos para a representação do PESD levam em consideração a construção de subestações e circuitos, outras pesquisas dão maior importância na busca de resultados em relação ao tamanho e a localização ótima das subestações e ainda outras se esforçam no desenvolvimento de modelos para resolver o problema de localização e capacidade ótimas dos circuitos (Lavorato 2010).

Dentro deste contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento e implementação de um novo algoritmo, baseado em um algoritmo heurístico construtivo (mas sem a utilização de modelagem matemática para a representação do problema) para resolver o problema da localização e capacidade ótimas de novos circuitos que irão compor a rede aérea de média tensão do sistema de distribuição.

## **2.2 Algoritmo Heurístico Construtivo**

Considerando o planejamento da expansão de redes aéreas, um AHC é um procedimento passo a passo em que, de maneira sistemática, busca-se encontrar uma boa proposta de expansão para este sistema de energia elétrica. A partir de uma configuração base (representada através dos dados iniciais do problema), em cada passo é adicionado um ou

vários circuitos até o momento em que o conjunto de adições realizadas permitam uma operação adequada do sistema elétrico.

Considerando o contido no parágrafo anterior, pode-se dizer que em cada passo do algoritmo a configuração do sistema é modificada pela adição de um ou vários circuitos, e esta configuração obtida passa a ser denominada como configuração corrente. Assim, o circuito escolhido em cada passo para ser adicionado à configuração corrente é um circuito que corresponde ao caminho mais atrativo identificado pelo chamado critério de sensibilidade, indicador de sensibilidade ou ainda índice de desempenho.

A diferença fundamental entre os AHCs, obviamente desconsiderando a questão do modelo matemático, está no indicador de sensibilidade escolhido para o processo.

Um pseudocódigo genérico para um AHC é apresentado na Figura 2.1.

```

Entrada: Dados de entrada D
Saída: Resultado R
IS = Indicador de sensibilidade
Enquanto(critério de parada não ser cumprido)
    IS = Calcular IS através dos dados D
    R = max(IS)
Fim – Enquanto
Saída = R

```

Figura 2.1: Pseudocódigo Genérico do AHC

Na Figura 2.1, a entrada de dados é representada por D, e assim enquanto um critério de parada escolhido pelo desenvolvedor não for cumprido, o indicador de sensibilidade (IS) é calculado através dos dados fornecidos por D. O IS, nesse caso, está sendo representado apenas para considerar os dados de entrada de D, mas um IS pode ser composto por variáveis provenientes de modelos matemáticos ou de novos parâmetros determinados através dos dados fornecidos por D.

O indicador de sensibilidade (IS) é primordial para o AHC. É ele o responsável pela tomada de decisão do processo sistemático, ou em outras palavras, é ele que define a construção da solução para o problema passo a passo. Ele é um parâmetro que pode assumir características diferentes conforme a natureza do problema. De alguma maneira, ele deve estar relacionado com a variação da função objetivo ou com algo que relaciona esta variação durante o processo de solução do problema, isto quando se considera a presença de um

modelo matemático representando o problema. Quando não há modelo matemático ele tem que ser baseado nos conhecimentos e na sensibilidade de um especialista.

De uma forma geral, seguem algumas das características dos IS:

- IS de caráter local, identifica a melhor estratégia para a configuração corrente sem levar em conta a configuração do sistema.
- IS de caráter global, identifica a melhor estratégia para configuração do sistema, mas levando em conta este como um todo não somente a configuração corrente.

Os IS locais nem sempre coincidem com os indicadores globais, e então os AHC (que são baseados nestes índices), frequentemente, não têm capacidade de encontrar as configurações ótimas globais de sistemas reais, mas podem chegar próximo chegando a ótimos locais próximo do ótimo global (Hashimoto 2005).

A seguir será apresentado uma revisão sobre AHCs.

## **2.3 Revisão Bibliográfica**

Na literatura especializada são encontrados vários trabalhos que utilizam AHCs no Planejamento da Expansão de Redes de Transmissão.

Pode-se dizer que na década de 70 foi desenvolvido o primeiro algoritmo de grande difusão usado no planejamento de sistemas de transmissão, apresentado em (Garver 1970). Este trabalho foi pioneiro em vários aspectos e entre os mais importantes podem ser citados os seguintes: (a) sugeriu uma nova forma sistemática para o planejamento, diferente das técnicas usadas na operação de sistemas elétricos, (b) apresentou o Modelo de Transporte para a representação do problema, (c) inaugurou a fase dos AHCs que foram muito usados nas décadas seguintes do século passado.

Após este trabalho apareceram novas pesquisas sugerindo um novo modelo matemático para a representação do problema, o Modelo DC. A diferença entre os dois modelos está no fato de que, enquanto o Modelo de Transporte tinha o compromisso de representar o problema apenas através da Lei de Correntes de Kirchhoff e das restrições de capacidades de circuitos, o modelo matemático denominado Modelo DC era uma evolução deste modelo, porque além da Lei de Correntes de Kirchhoff e das restrições relacionadas com a capacidade de circuitos,

também havia uma restrição que representava a Lei de Tensões de Kirchhoff. O AHC apresentado em (Monticelli et al. 1982) conhecido como Algoritmo de Mínimo Esforço era um AHC que utilizava como modelagem matemática o Modelo DC. Uma versão diferente para este algoritmo foi apresentada em (Pereira and Pinto 1985) e ficou conhecido como Algoritmo de Mínimo Corte de Carga. Com relação à técnica de solução, também era empregado um AHC, mas com relação ao Modelo DC apresentado em (Monticelli et al. 1982), era ligeiramente modificado, levando em consideração agora o conceito de “geração fictícia”, que depois foi amplamente difundido nos modelos matemáticos para a solução de problemas de planejamentos de sistemas elétricos. Outros modelos matemáticos que mesclavam características do Modelo de Transportes para determinadas partes da rede e características do Modelo DC para a parte restante foram apresentados (Villasana, Garver, and Salon 1985; Levi and Calovic 1991).

No trabalho de (Romero et al. 2003) foi feita uma análise sobre alguns AHC aplicados ao planejamento da expansão dos sistemas de transmissão com suas modelagens matemáticas estendidas para programação multiestágios. Na pesquisa publicada por (Romero et al. 2005) é apresentado um novo AHC, que possuía características do algoritmo apresentado por (Garver 1970) mas que utilizava o Modelo DC para a representação da rede.

Em (Sousa and Asada 2009) foi apresentado um AHC que utilizava uma lógica Fuzzy, que segundo os autores, melhorava o desempenho do algoritmo contornando alguns problemas verificados. Já no trabalho apresentado por (Zeinaddini-Maymand et al. 2011) um AHC foi aplicado para resolver um modelo não linear utilizando uma metodologia baseada também no trabalho apresentado por (Garver 1970).

Em (Camargo, Lavorato, and Romero 2013) foi proposto um modelo que considerava cenários de várias gerações, com a metodologia encontrando solução de alta qualidade considerando sistemas que possuíam múltiplas gerações.

Pode-se dizer que, diferente do que acontece com o Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão, em PESD existem poucas pesquisas que empregam os AHCs para a busca da solução.

Exemplos de aplicação destes algoritmos podem ser encontrados em (Lavorato et al. 2010; Ponnavaikko, Rao, and Venkata 1987; Rocha et al. 2012; ROCHA et al. 2012).

Em (Ponnavaikko, Rao, and Venkata 1987) foi apresentado um modelo formulado através de Programação Quadrática Inteira Mista, que era resolvido em dois estágios,

considerando os custos fixos de subestações e linhas e os custos relacionados às perdas de energia na linha.

No trabalho de (Lavorato et al. 2010) o problema foi modelado como um problema Programação Não-Linear Inteiro Misto (PNLIM) e foi proposto um AHC para a busca de solução. Em cada iteração do AHC, um problema de Programação Não-Linear (PNL) era resolvido para obter um indicador de sensibilidade que era usado para adicionar um circuito, uma subestação, um banco de capacitores ou reguladores de tensão. O problema de PNL era obtido com o relaxamento da natureza binária das variáveis de decisão que eram consideradas como variáveis contínuas (mas restritas). O objetivo do problema de PNL era minimizar os custos da operação e de construção do sistema de distribuição em um determinado espaço de tempo previamente definido, e as restrições eram a demanda atendida, os níveis de tensão exigidos, a capacidade dos circuitos e das subestações e a configuração radial do sistema.

Em (Rocha et al, 2012) foi apresentado um AHC para resolver um novo modelo matemático para a representação da rede em sistemas de distribuição, denominado de Modelo Híbrido Linear. A ideia do trabalho foi adaptar um modelo híbrido que havia sido empregado amplamente para o planejamento da expansão de sistemas de transmissão (Villasana, Garver, and Salon 1985) para a aplicação no PESD. Em (ROCHA et al, 2012) foi apresentado um novo AHC para ser aplicado no PESD, e diferente da maioria dos trabalhos, para compor as informações para o indicador de sensibilidade foi utilizado os resultados obtidos através da solução estabelecida por uma sub-rotina que calculava o fluxo de potência CA através do método de *Newton-Rhapson*.

## 2.4 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo procurou-se mostrar as aplicações e a importância dos algoritmos heurísticos para o processo de busca de solução em problemas relacionados com SEP.

Foi verificado que o problema de PESD é amplo e neste sentido foi estabelecido que a pesquisa que foi desenvolvida iria tratar do problema de planejamento da expansão de redes aéreas de média tensão de sistemas de distribuição, procurando resolver o problema da localização e capacidade ótimas de novos circuitos.

Foi realizada uma introdução às técnicas de solução empregadas na busca da solução para o PESD, relacionando estas técnicas com trabalhos encontrados na literatura especializada.

Entre as técnicas empregadas para a solução, estão as que utilizam o Algoritmo Heurístico Construtivo. A estrutura de um AHC empregado para o planejamento da expansão de redes elétricas foi definida.

Foi verificado que AHCs já foram amplamente utilizados em Planejamento de Sistemas de Transmissão, porém não existe ainda muita aplicação divulgada na literatura especializada para a busca de solução dos problemas relacionados com o PESD, especialmente quando o problema é a localização e a capacidade ótima de novos circuitos.

Em planejamento de sistemas elétricos, a maioria dos trabalhos utilizam uma modelagem matemática para a representação do problema. O que diferencia um trabalho com relação ao outro é a técnica aplicada para a solução ou o modelo matemático utilizado na representação do problema.

Existe campo para aplicação de algoritmos heurísticos para resolver os problemas de PESD. Neste sentido, se a solução obtida não for a ótima global, no mínimo, ela pode melhorar - e muito - o desempenho computacional na busca pela solução ótima global, pois ela poderá servir como solução inicial em processo de busca com técnicas de otimização mais complexas.

# Capítulo 3

## Método *Backward Forward Sweep*

### 3.1 Introdução

O método BFS é um método de varredura utilizado para o cálculo do fluxo de potência bastante conhecido na literatura. Existem algumas variações desse método na literatura: para sistemas monofásicos, trifásicos, com geração distribuída e outros. Nesse capítulo serão apresentadas: (a) uma breve revisão sobre este método e, (b) um algoritmo para o método com enfoque na representação monofásica da rede.

### 3.2 Revisão Bibliográfica

O BFS é um método de varredura para o cálculo de fluxo de potência. Originalmente ele foi proposto por Shirmohammadi et al (1988) e consistia em um novo método para o cálculo do fluxo de potência para redes de distribuição e transmissão fracamente malhadas, usando uma técnica de compensação multiponto e as formulações básicas das leis de Kirchhoff.

Já em 1995, (Cheng and Shirmohammadi 1995) apresentaram um método para o fluxo de potência trifásico para análise em tempo real dos sistemas de distribuição considerando as redes de média tensão. Este método é uma extensão direta do método de fluxo de potência baseado em compensação para sistemas fracamente malhado de distribuição (Shirmohammadi et al. 1988), onde a modelagem monofásica foi estendida para a modelagem trifásica, considerando a modelagem de geração distribuída, cargas desequilibradas e distribuídas, reguladores de tensão e capacitores shunt.

Um dos trabalhos em que foi proposto o cálculo do fluxo de potência utilizando quatro fios foi (Ciric, Feltrin, and Ochoa 2003), através de um algoritmo de fluxo de potência geral para redes

de distribuição radiais de quatro fios trifásica, sendo baseado na técnica de (Shirmohammadi et al. 1988), sendo tanto o fio neutro, quanto o terra, explicitamente representados.

Em Pantuzi and Padilha-Feltrin (2006) foi proposto um algoritmo para fluxo de potência utilizando cinco fios, tratando o terra como condutor perfeito, os mesmos levaram em conta várias situações como: barras conectadas com linhas longas e linhas curtas, presença de reguladores de tensão, presença de geração distribuída, presença de linhas com representação shunts, sistemas com carregamento leve, carregamento médio e carregamento pesado e a influência de modelos de cargas (potência constante, admitância constante e corrente constante).

O método BFS está sempre em evolução na literatura, mostrando a sua ampla aplicação e aceitação como ferramenta de auxílio para a determinação do estado da rede. Modificações, utilizações e aplicações mais recentes podem ser consultadas em: (Yao et al. 2009; Wang et al. 2010; Tomoiaga et al. 2011; Kocar and Lacroix 2012).

### ***3.3 Backward Forward Sweep***

Este método é considerado um dos mais eficientes para calcular o fluxo de potência CA em sistemas de distribuição radial. Além disso, é um método iterativo e utiliza um esquema de varredura segmentando a rede em camadas que agrupam os nós mais próximos da subestação até os mais afastados conectados pelas linhas de distribuição, apresentando, então, o sistema no formato de uma árvore.

Esse método consiste em dois passos básicos, com um antecedendo o outro:

*Backward Sweep* – Esse primeiro processo inicia-se das barras finais em direção à subestação. Um exemplo dessa varredura em sentido à subestação é mostrado na Figura 3.1, onde são calculadas as correntes das linhas, entretanto é necessário um valor de tensão inicial e os dados de demanda (carga) para cada barramento do sistema.

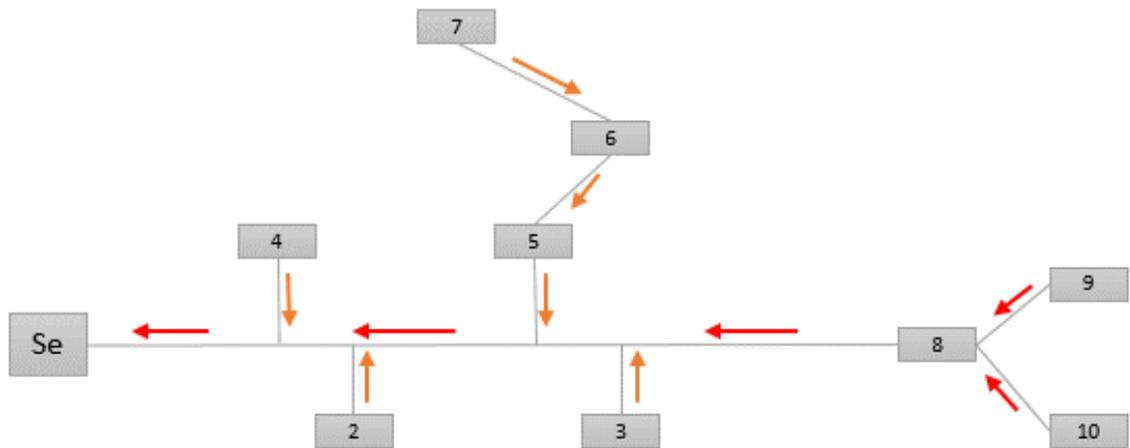


Figura 3.1: *Backward Sweep*

*Forward Sweep* – Esse segundo processo acontece de maneira contrária, partindo da subestação até os barramentos finais como pode ser visto na Figura 3.2. Nesse passo são calculadas as quedas de tensão com as atualizações das tensões estabelecidas no processo anterior.

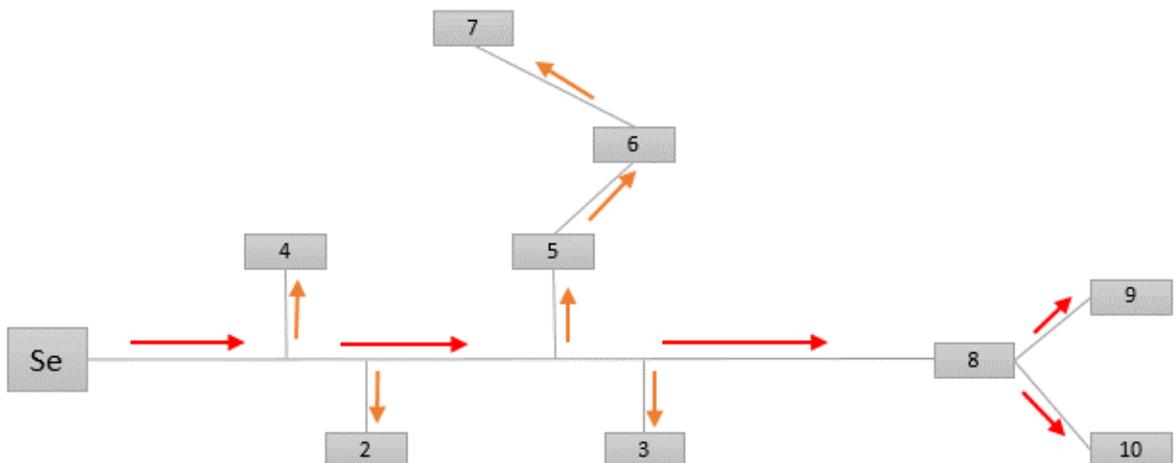


Figura 3.2: *Forward Sweep*

Esses passos são repetidos até que se obtenha a convergência do algoritmo.

Como possui boas características de convergência e sendo considerado robusto, tornou-se um dos principais métodos de solução, e serviu como base para muitos métodos propostos posteriormente. Este método pode ser aplicado também para sistemas fracamente malhados, ou seja, sistemas que apresentam poucas interligações, onde são convertidos em redes radiais. (GRAVENA JUNIOR, 2011).

### 3.3.1 Formulação do Método

Considerando-se o que foi dito anteriormente, e com o intuito de explicar melhor o funcionamento desse algoritmo, pode-se dividi-lo em cinco etapas:

- Etapa 1: Atribuir valores de tensões para as barras (normalmente se utiliza um 1 pu ou o valor de tensão do barramento onde está conectada a subestação).
- Etapa 2: Calcular a injeção de corrente nas barras:

$$I_k = \left(\frac{S_k}{V_k}\right)^* \cdot V_k, k = 1, \dots, NB \quad (3.1)$$

Sendo,

$I_k$  – Corrente na barra  $k$ ,

$S_k$  – Potência Aparente (carga) na barra  $k$ ,

$NB$  – Número total de barras.

$V_k$  – Tensão na barra  $k$

- Etapa 3: *Backward Sweep*, cálculo das correntes em todos os ramos (ramos finais para a subestação):

$$I_k = I_m + \sum_{j \in Fm} I_{mj} \quad (3.2)$$

Sendo,

$I_{km}$  – Corrente no ramo entre as barras  $k$  e  $m$ ,

$I_m$  – Corrente na barra  $m$ ,

$Fm$  – Conjunto das barras alimentadas pela barra  $m$ .

- Etapa 4: *Forward Sweep*, cálculo para atualização das tensões (ramo que conecta o barramento da subestação com os outros, para os ramos finais):

$$V_m = V_k - Z_{km} \cdot I_{km} \quad (3.3)$$

Sendo,

$V_m$  – Tensão na barra  $m$ ,

$Z_{km}$  – Impedância do ramo entre as barras  $k$  e  $m$ .

- Etapa 5: Teste de convergência do erro ( $\Delta$ ):

$$\Delta S_k = \text{abs}(S_k) - \text{abs}(Saux_k), K = 1, \dots, NB \quad (3.4)$$

$$\max(\Delta S_k) = \Delta \quad (3.5)$$

Sendo,

$S_k$ - Potência aparente - dado de entrada do sistema;

$Saux_k$ - Potência calculada através dos dados de saída do Fluxo de Potência;

$\Delta S_k$  – Máximo valor da variação de potências.

Se  $\Delta \leq$  Tolerância então “solução obtida” e fim do método, mas em caso contrário, retornar a Etapa 2.

Para o processo de convergência são analisadas as diferenças entre a potência aparente - que é um dado de entrada - e a potência que é calculada. Se estes valores de diferença forem menores que uma tolerância, considera-se que o algoritmo convergiu.

Esse foi o critério de convergência utilizado na subrotina com este método, que foi implementada em GAMS, para utilização do AHC. Porém, na literatura existem outros critérios de convergência que são utilizados, como por exemplo a “variação de tensão” que pode ser visualizada na equação (3.6).

$$\Delta V_k = \text{abs}(V_k) - \text{abs}(Vaux_k), K = 1, \dots, NB \quad (3.6)$$

$$\max(\Delta V_k) = \Delta \quad (3.7)$$

Sendo,

$V_k$ - Valor de tensão estabelecido no processo *Backward Sweep*

$Vaux_k$ - Valor de tensão corrigido no processo *Forward Sweep*

$\Delta V_k$  – Valor da variação das tensões.

Assim quando  $\Delta \leq$  Tolerância estabelecida, o algoritmo convergiu.

Para uma condição de Tolerância estabelecida, a utilização da potência como critério de convergência pode levar o método a ter algumas iterações a mais, ou seja, demorar mais para chegar a um resultado factível, mas como contrapartida, um ponto positivo é que utilizando esse critério o método pode chegar mais próximo do ponto ótimo (ou em outras palavras, com

valores mais exatos para todos aqueles parâmetros envolvidos no cálculo do fluxo de potência CA).

### 3.4 Considerações Finais do Capítulo

Nesse capítulo foi apresentada a versão original do método para o cálculo de fluxo de potência CA e que foi utilizada como subrotina para o cálculo de fluxo de potência, cujo resultado foi utilizado para compor o IS do AHC, para o processo de tomada de decisão.

O método BFS não é um método exato, mas chega a resultados próximos do ótimo global sendo bastante robusto e rápido. Ele pode ser considerado um dos métodos mais utilizados na atualidade para o cálculo do fluxo de potência em redes radiais.

Foi apresentada uma breve revisão bibliográfica que mostra que o método pode ser aplicado a sistemas radiais monofásicos, fracamente malhado, trifásico, trifásico 4 fios, trifásicos 5 fios e a sistemas com geração distribuída, entre outras.

Também foram apresentadas as 5 etapas que mostram a operacionalização do método e que podem sofrer alterações conforme a aplicação ou o tipo de rede utilizada para o estabelecimento do fluxo de carga. A formulação apresentada se aplica a redes de distribuição radiais com representação monofásica e com as linhas modeladas como linhas curtas.

Por fim, a principal consideração é que este método não precisa resolver um sistema de equações não lineares. Não há a necessidade de se estabelecer valores para “variáveis”. Como principal consequência disto, ao invés de se trabalhar com variáveis, busca-se trabalhar com parâmetros, e como foi programada utilizando a versão estudantil de GAMS, não houve a necessidade de utilizar nenhum *solver* (o que torna o processo de busca de solução muito mais rápido).

# Capítulo 4

## Algoritmo AHC Especializado

### 4.1 Introdução

O presente capítulo apresenta o AHC especializado. Para o seu desenvolvimento foi utilizado um AHC (Capítulo 2) e uma subrotina que calcula o fluxo de potência CA nas iterações do AHC, utilizando o método BFS (Capítulo 3). O AHC especializado foi implementado em linguagem GAMS (Sistema Geral de Modelagem Algébrica) versão estudantil, levando-se em consideração o conceito de Conjuntos Dinâmicos (Brooke, Kendrick, and Meeraus 1997).

A seguir será apresentado o AHC especializado, com suas principais características, com os indicadores de sensibilidade que foram utilizados, a forma de operacionalização da subrotina, fluxogramas para melhor ilustrar o algoritmo e, por fim, as considerações finais do capítulo.

### 4.2 AHC Especializado

Para o desenvolvimento do algoritmo especializado e para a sua implementação, foi levado em consideração o conceito de Conjuntos Dinâmicos (Brooke, Kendrick, and Meeraus 1997), que é uma característica da programação em GAMS.

Para o desenvolvimento do algoritmo, inicialmente três conjuntos devem ser definidos no início do processo de solução: (a) Conjunto A, (b) Conjunto B, e (c) Conjunto C.

O Conjunto A deve comportar as linhas que já existem do sistema. Se existirem mais de uma subestação no sistema, uma forma de contornar este problema é subdividindo este

conjunto, dando origem a subconjuntos, com número diretamente proporcional ao número de subestações e, considerando o fato de que o sistema deve ser radial, ou seja, abastecido por apenas uma subestação, cada subconjunto deverá estar relacionado a apenas uma subestação.

O Conjunto B é formado pelas linhas que podem ser adicionadas. Esta versão do algoritmo considera que todas as linhas que são candidatas à adição ou existentes podem ser substituídas uma vez, por outra linha de maior capacidade. Por fim, o Conjunto C é formado por todas as linhas do sistema.

Se na etapa inicial do processo o Conjunto A for vazio, o algoritmo deve escolher a linha de menor custo para a conexão da subestação ao sistema, isto se houver opção de escolha. Se existem mais de uma subestação, da mesma forma, uma estratégia para ser empregada é conecta-las por linhas de menor custo ao sistema, separadamente, mantendo-se sempre a radialidade.

Durante o processo iterativo, os conjuntos definidos anteriormente podem ser modificados, de acordo com o processo de tomada de decisão. Para cada iteração do algoritmo, verifica-se a necessidade de substituição de linhas existentes com excesso de carregamento. Se há necessidade, o algoritmo não utiliza o IS para identificar qual deve ser substituído, a estratégia utilizada para este caso é, se isto acontecer, identificar aquele ou aqueles que estiverem associados com estes excessos e substituí-los pelos respectivos circuitos de maior capacidade. Assim, para estes circuitos são feitas as atualizações dos parâmetros numéricos, junto ao Conjunto A, e são atualizados os custos de construção de circuitos. Se não houver a necessidade de substituição, inicia-se o processo de adição de novas linhas.

O algoritmo também verifica se algum limite de tensão em barramento foi violado. Se isto ocorrer, a linha existente identificada com o maior carregamento e que ainda não foi substituída é substituída.

No processo de adição de novas linhas, em cada nova iteração, se identifica todas aquelas linhas que estão presentes no Conjunto B que, se adicionadas, mantém a forma radial para o sistema. Para aquelas que cumpram esta condição, uma é escolhida pelo IS do algoritmo, e esta linha candidata identificada pelo IS é a que passará a fazer parte do sistema na próxima iteração do algoritmo. Assim, esta linha deixa de ser candidata, em outras palavras, deixa de fazer parte do Conjunto B (é excluída deste conjunto) e passa a fazer parte do Conjunto A (é adicionada a este conjunto), para a próxima iteração.

Se não houver mais a ação de substituição, o processo de adição de linhas continua até que não seja mais necessária nenhuma adição, ou seja, até o momento em que todos os barramentos do sistema estejam conectados.

Antes da apresentação e da descrição do IS, é conveniente um comentário a respeito de como o algoritmo realiza as adições dos novos circuitos sem perder de vista a característica radial dos sistemas de distribuição.

Para realizar a tarefa de verificar qual dos circuitos candidatos à adição da iteração que, se adicionados, ainda permitem que o sistema seja radial, o algoritmo aproveita a informação daqueles circuitos que fazem parte do Conjunto A, identificando-se aqueles barramentos que já possuem conexão com o sistema. Dentro do Conjunto B, todas aquelas linhas que possuem apenas um de seus barramentos de conexão já conectados ao sistema são as que serão selecionadas, aquelas que não possuem nenhum de seus barramentos conectados (linha que, se adicionada, estaria isolada no sistema), ou que possuem seus dois barramentos já conectados ao sistema (linha que, se adicionada, fecharia um laço para o sistema), são descartadas. Uma vez realizada esta tarefa, ou selecionadas estas linhas, deve-se escolher aquela que, na iteração, será a indicada para ser adicionada. Para fazer esta escolha, o algoritmo utiliza o IS.

### 4.2.1 Indicador de Sensibilidade

Para compor o IS do algoritmo foi considerada duas alternativas.

A primeira delas leva em consideração para a linha candidata à adição do processo iterativo corrente o valor da tensão no barramento de conexão e o custo da respectiva linha. O que se persegue com este indicador de sensibilidade é conectar linhas mais baratas (entre as disponíveis para conexão) aos barramentos com melhor perfil de tensão (também entre os disponíveis para conexão). A composição matemática para o IS para estas considerações perseguidas é apresentada a seguir:

$$IE = \left( \frac{v}{c_{ij}} \right) \quad (4.1)$$

$$IS = \max\{IE\} \quad (4.2)$$

Em (4.1),  $v$  representa a magnitude da tensão no barramento que já possui conexão com o sistema e será o local aonde o circuito candidato irá se conectar. O outro elemento desta equação,

$c_{ij}$ , representa o custo do respectivo circuito. Desta maneira, para todos os circuitos selecionados na iteração como candidatos à adição para a iteração, um valor para  $IE$  é estabelecido. O circuito escolhido para a adição será aquele com o maior valor estabelecido para  $IE$ , ou seja, será aquele identificado por (4.2).

Neste caso, os valores de  $v$  são determinados através da subrotina, que é chamada uma única vez por iteração pelo AHC, para o cálculo do fluxo de potência, estabelecendo o estado do sistema existente (Conjunto A). Assim, a subrotina identifica o perfil de tensão e o carregamento do sistema para a iteração corrente e para o sistema existente.

Para a segunda alternativa de composição do IS para o AHC foi elaborada uma forma de levar em consideração também as perdas elétricas através da utilização da subrotina. A estratégia utilizada foi obter os valores para  $v$  e  $c_{ij}$  da mesma forma que para o outro indicador, e além disso, simular a entrada para cada circuito candidato à adição da iteração. Assim, para cada simulação de entrada de circuito, é acionada a subrotina e o valor das perdas elétricas é obtida e armazenada em  $Tperdn$ . Neste caso a subrotina é solicitada mais vezes, aumentando o tempo de busca e o esforço computacional. A composição matemática para o IS para estas considerações perseguidas é apresentada a seguir:

$$IE = \left( \frac{v}{c_{ij} * Tperdn} \right) \quad (4.3)$$

$$IS = \max\{IE\} \quad (4.4)$$

A equação (4.3) quando comparada com a (4.1) é diferenciada pela presença do elemento  $Tperdn$ . Os circuitos que são candidatos à adição podem se conectar em barramentos de conexão que são comuns a outros circuitos candidatos ou não. Para àqueles que se enquadrem no primeiro caso,  $v$  permanece constante enquanto que os outros elementos do indicador teriam valores diferentes para cada circuito candidato nesta situação. Para àqueles que pertencem ao outro caso, nenhum elemento permanece constante.

Da mesma maneira que para a alternativa do IS anterior, para todos os circuitos selecionados na iteração como candidatos à adição para a iteração, um valor para  $IE$  é estabelecido. O circuito escolhido para a adição será aquele com o maior valor estabelecido para  $IE$ , ou seja, será aquele identificado por (4.4).

Assim é ponderado no indicador o maior valor para a tensão no barramento de conexão, o menor custo de construção de circuito e o menor valor para as perdas elétricas (considerando a

iteração corrente e a simulação da entrada de cada circuito candidato). A seguir é apresentado um fluxograma para o AHC especializado.

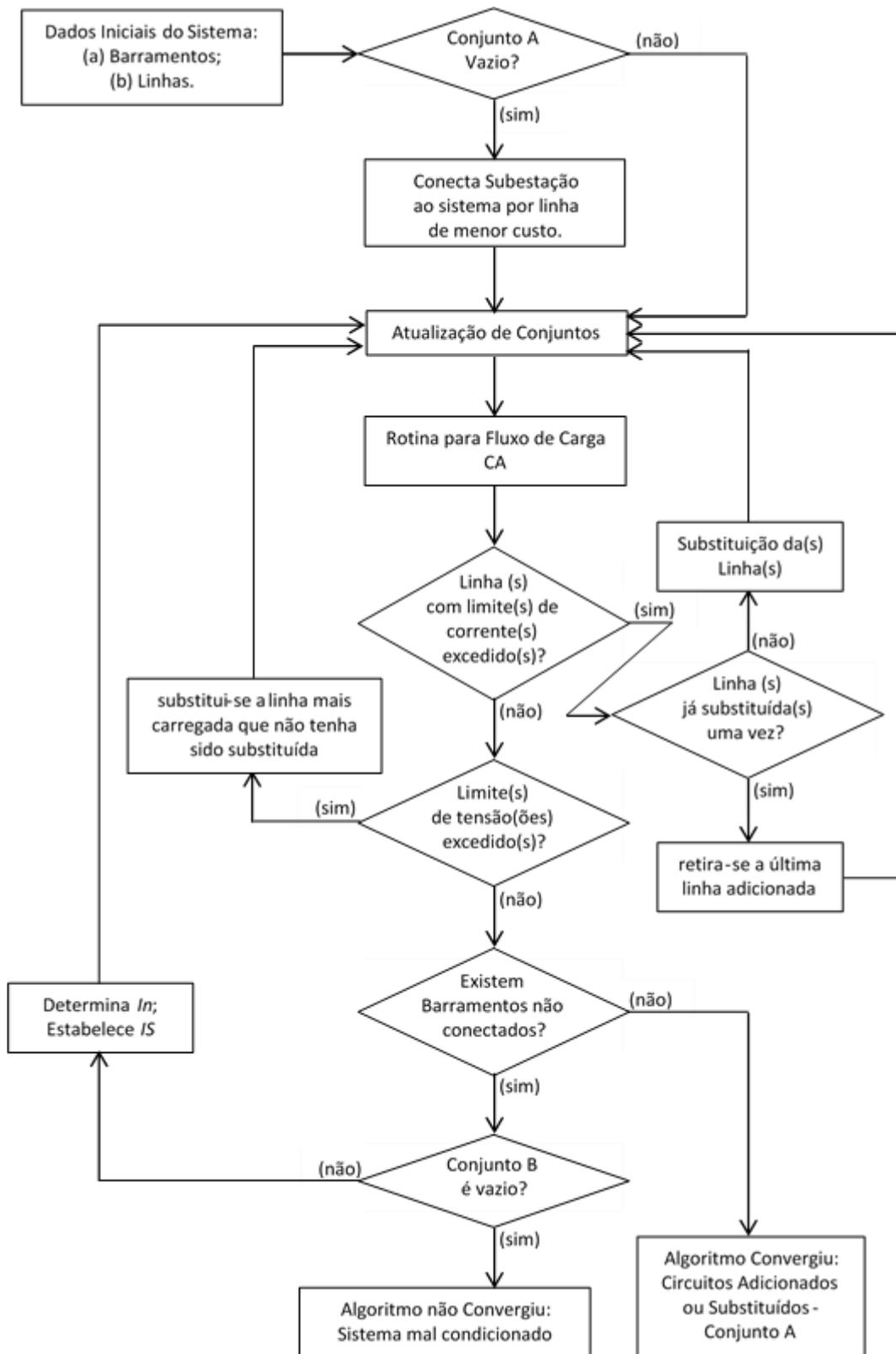


Figura 4.1: Fluxograma AHC especializado

### 4.3 Exemplo AHC Especializado

Nesta seção é apresentado um exemplo ilustrativo para tornar mais claro o entendimento do algoritmo.

Para o exemplo ilustrativo foi considerado uma parte do sistema de 23 barras, cujos dados são descritos no Capítulo 5. A Figura 4.2 representa esta parte do sistema considerado, com a representação dos barramentos de carga e da subestação.

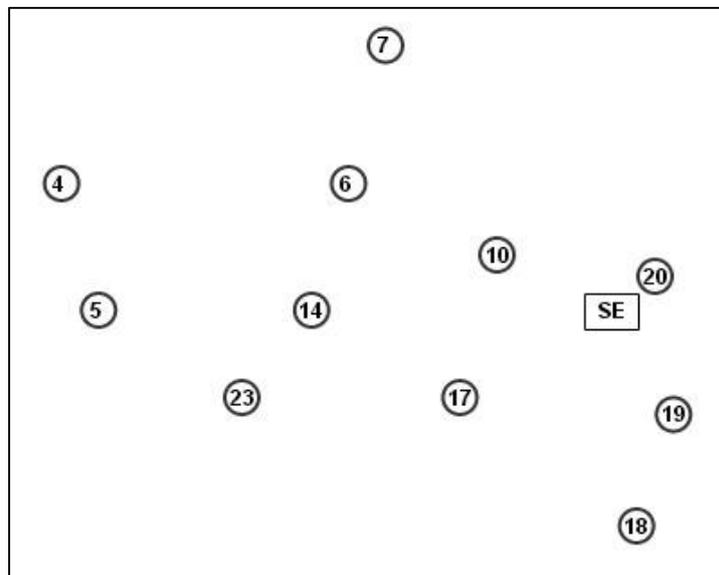


Figura 4.2: Sistema Exemplo

Para a primeira iteração do algoritmo, não há linhas construídas e neste caso o Conjunto A é vazio. Assim, o algoritmo procura conectar a subestação em um barramento do sistema, onde exista possibilidade e com o menor custo possível. Neste caso só existe uma opção, que é a construção da linha (01-10).

A Figura 4.3 ilustra esta iteração, mostrando o único caminho (identificado pelo traçado tracejado) possível de ser construído e o respectivo indicador de sensibilidade obtido. Para este exemplo, o indicador de sensibilidade utilizado foi o apresentado em (4.1).

Para ilustrar o processo de construção, na Figura 4.4 é apresentada a linha construída (identificada pelo traçado contínuo), com esta linha passando a fazer parte do Conjunto A.



tracejado, também pode-se observar os indicadores de sensibilidade obtidos para cada uma das candidatas a adição. Neste caso, o máximo valor obtido foi aquele relacionado com a linha (10-14) que passa a ser então a linha indicada para ser construída.

A linha identificada para ser construída deixa o conjunto de linhas candidatas e passa a fazer parte do conjunto de linhas existentes, assim, a linha (10-14) deixa de fazer parte do Conjunto B e passa a fazer parte do Conjunto A para a próxima iteração.

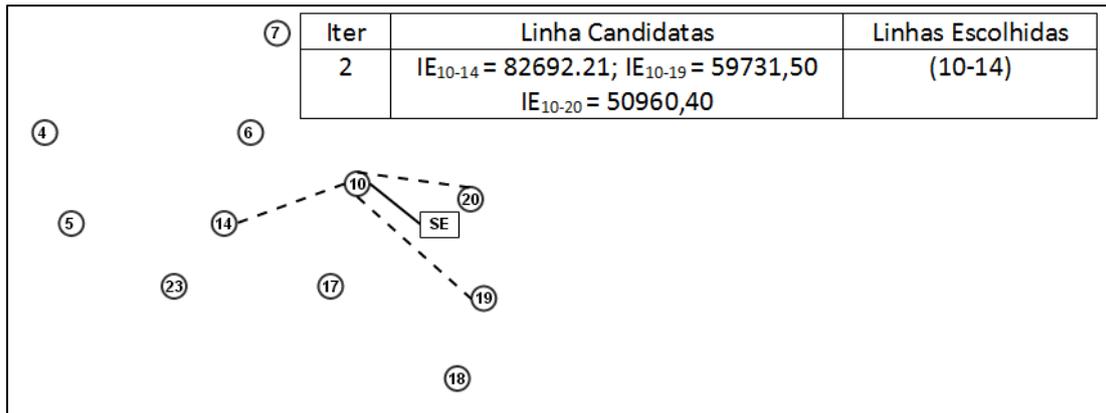


Figura 4.5: Segunda Iteração linhas Candidatas

Para a terceira iteração, as linhas (01-10) e (10-14) estão construídas. A Figura 4.6 ilustra esta situação, identificando as respectivas linhas com traçados contínuos.

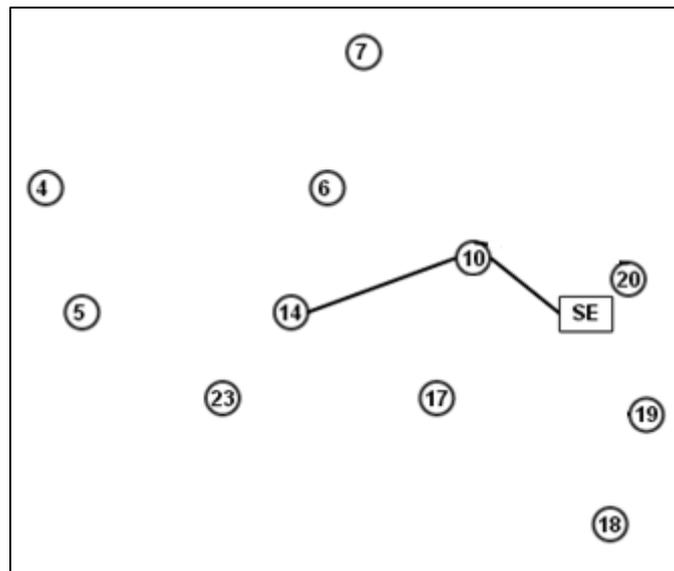


Figura 4.6: Segunda Iteração linhas construídas

A Figura 4.7 representa as linhas candidatas para a terceira iteração (identificadas com traçado tracejado). As linhas (01-10) e (10-14) pertencem ao Conjunto A e as linhas (5-14), (06-14), (10-19), (10-20), (14-17) e (14-23), são identificadas dentro do Conjunto B como linhas candidatas. Nesta mesma figura também pode-se observar os indicadores de sensibilidade obtidos para cada candidata a adição. Neste caso, o máximo valor obtido foi aquele relacionado com a linha (14-17) que passa a ser então a linha indicada para ser construída.

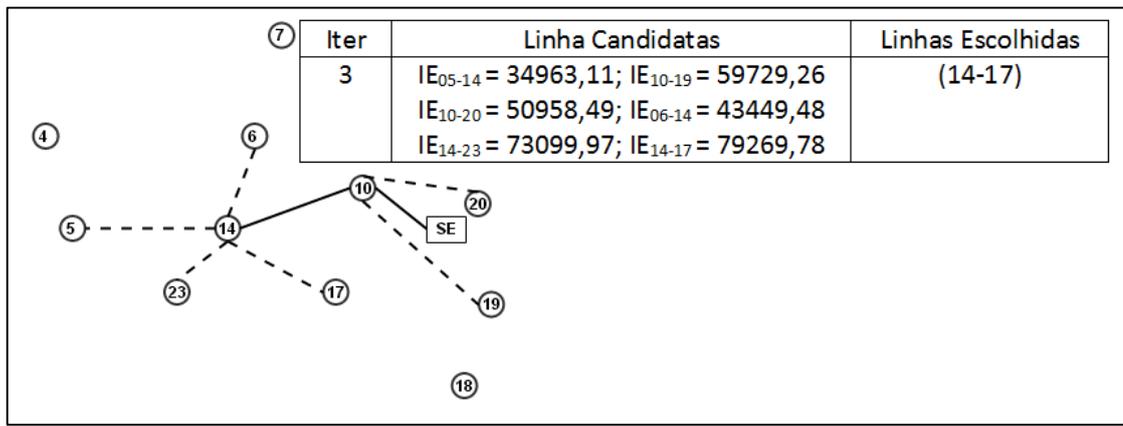


Figura 4.7: Terceira Iteração linhas Candidatas

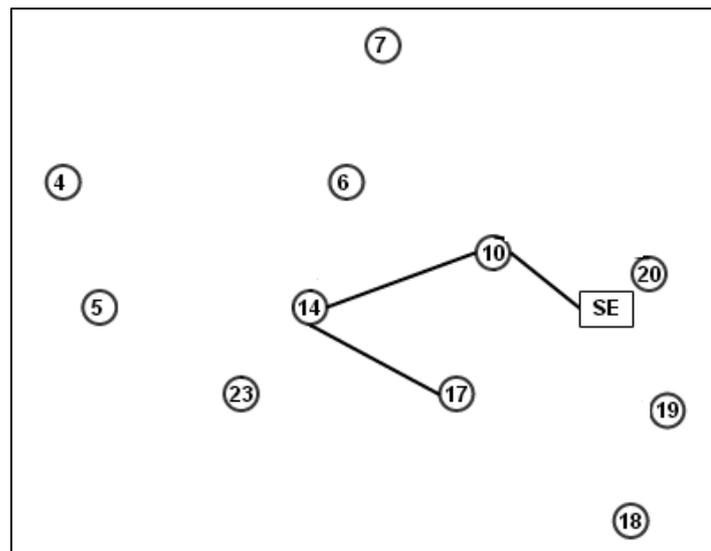


Figura 4.8: Terceira Iteração linhas Construídas

A linha identificada para ser construída deixa o conjunto de linhas candidatas e passa a fazer parte do conjunto de linhas existentes, assim, a linha (14-17) deixa de fazer parte do

Conjunto B e passa a fazer parte do Conjunto A para a próxima iteração. A Figura 4.8 ilustra esta situação, identificando as linhas que são pertencentes ao Conjunto A através de traçados contínuos.

É desta forma que o algoritmo vai determinando uma topologia final para o sistema. Neste sentido, enquanto todas as barras não estiverem conectadas ao sistema da subestação, haverá uma iteração para tomada de decisão.

### 4.3.1 Subrotina *Backward Forward Sweep*

A subrotina para o cálculo de fluxo de potência BFS utiliza uma abordagem orientada aos ramos para melhorar o desempenho numérico e também um ordenamento por camadas. Um exemplo da forma de ordenamento pode ser visualizado na Figura 4.9. Com a utilização de camadas é simples localizar os nós extremos e os caminhos à jusante e à montante.

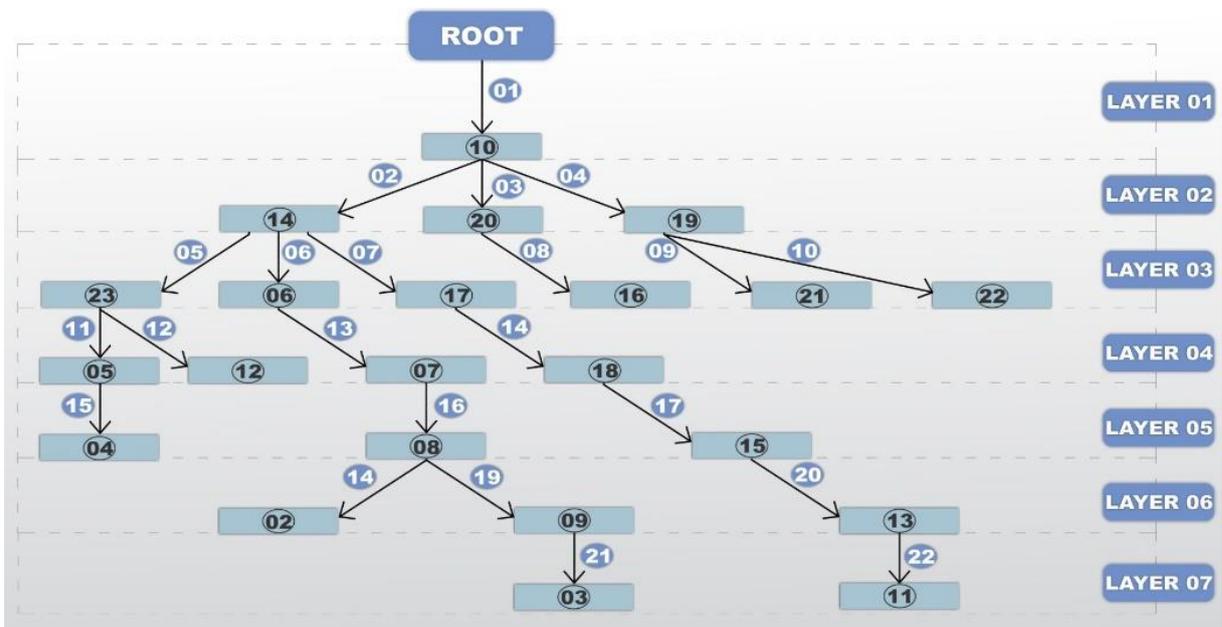


Figura 4.9: Numeração dos Ramos

Todavia, a cada interação do AHC o sistema passa por alguma mudança e isso ocorre porque a cada interação do AHC uma linha nova é adicionada ao sistema e por esse motivo a numeração de ramos do mesmo é alterada a cada interação. Pode ser alterada mais de uma vez por interação, quando, por exemplo, o AHC estiver utilizando o  $IS$  estabelecido em (4.4), com o  $In$  obtido através de (4.3).

Assim, a subrotina foi desenvolvida para tratar esse problema de forma dinâmica, utilizando duas etapas para funcionamento: uma para numeração das camadas e outra para numeração dos ramos, a cada vez que for acionada.

Neste contexto, o algoritmo monta as camadas, sendo estas montadas a partir da subestação, estabelecendo esta como fixa, buscando todos os nós (levando em consideração o Conjunto A) ligados a subestação e monta a primeira camada. Depois ele verifica todos os nós que estão ligados aos nós da primeira camada (também levando em consideração o Conjunto A) e monta a segunda camada, e segue esses passos até chegar a última camada do sistema.

Na segunda etapa é feito a numeração ordenada das linhas camada por camada. Na Figura 4.10 é apresentado um fluxograma representando o funcionamento da subrotina BFS.

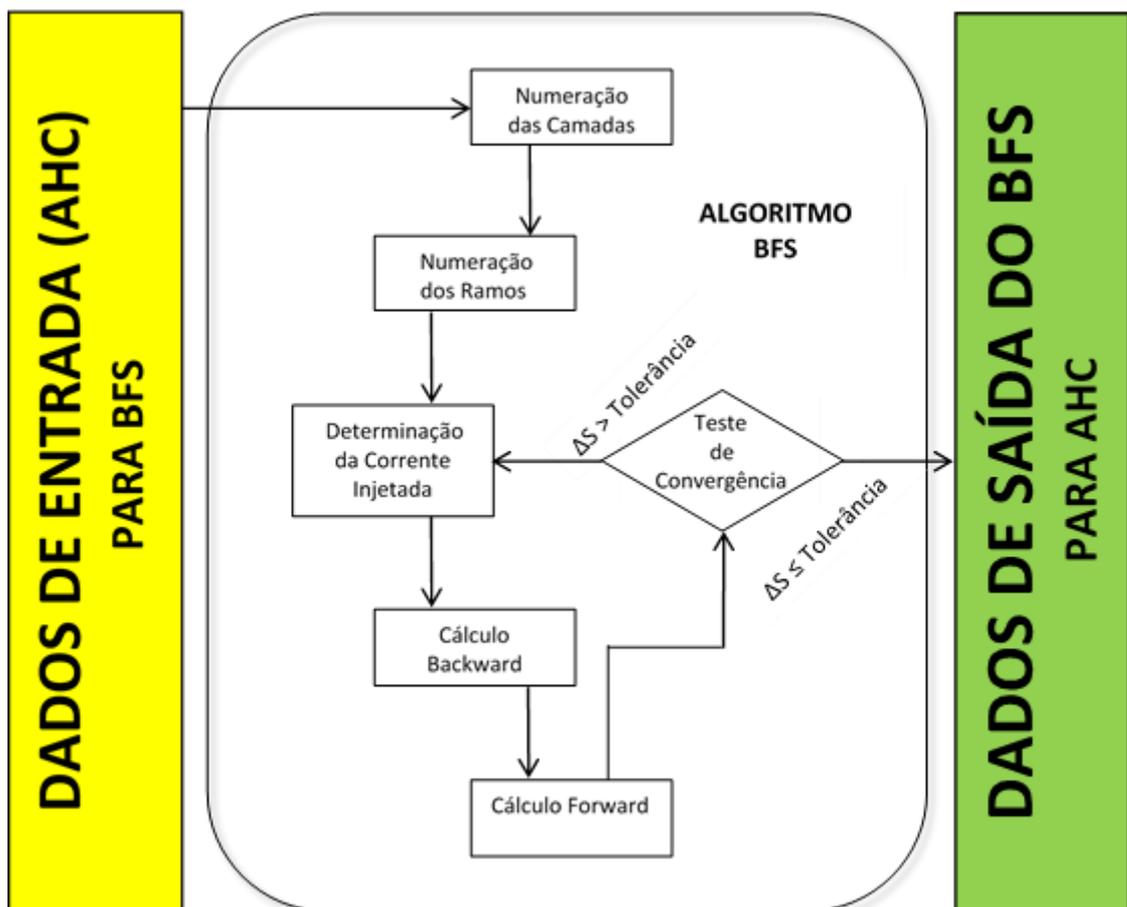


Figura 4.10: Fluxograma do Algoritmo da subrotina BFS

## 4.4 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foram feitas as descrições: (a) do AHC especializado para ser aplicado no problema de planejamento da expansão de redes aéreas de média tensão do sistema de distribuição, (b) dos indicadores de sensibilidade implementados para a tomada de decisão do AHC e (c) da subrotina para o cálculo do fluxo de potência (através do método de BFS).

Foi visto que, para a tomada de decisão, o AHC especializado não utiliza resultados obtidos através da solução de um modelo matemático, com função objetivo e restrições. Assim, o algoritmo não necessita de um *solver* para resolver o problema. Ao invés disto, procurou-se a alternativa de buscar a informação através da solução promovida por uma subrotina que tem a capacidade de retornar os resultados obtidos com a solução de fluxo de potência CA, para compor o indicador de sensibilidade, para a tomada de decisão.

Esta estratégia foi adotada para melhorar o tempo computacional para se determinar uma solução factível para o problema, porque um AHC não tem capacidade de encontrar o valor ótimo global do problema, mas por outro lado, por ser de fácil implementação e robusto no processo de busca da solução, quase sempre encontra uma solução factível de boa qualidade para o problema, sendo muito difícil a sua não convergência.

Pode-se dizer que uma parte muito importante do processo de implementação do AHC é determinar como será o IS. Isto porque é através do IS que o AHC consegue tomar uma decisão em cada iteração do processo de busca pela solução. Um IS mal escolhido pode levar o AHC para muito longe da solução ótima e no pior dos piores casos, pode fazer com que o processo de busca pela solução acabe por não convergir.

Para o AHC especializado foi apresentado dois indicadores de sensibilidade diferentes. Os dois utilizam dados fornecidos pela subrotina BFS. O primeiro deles leva em consideração o valor da tensão nos barramentos que estão conectados ao sistema e por onde podem se conectar os circuitos que são candidatos à adição, e os respectivos custos destes circuitos. O segundo, além destes elementos, também considera a informação das perdas elétricas, fornecidas pela subrotina através da simulação da entrada de cada circuito candidato à adição do respectivo processo iterativo.

# Capítulo 5

## Testes e Resultados

### 5.1 Introdução

O AHC especializado descrito no capítulo anterior (Capítulo 4) foi implementado utilizando a versão estudantil do programa GAMS. Para mostrar o desempenho computacional do algoritmo foram realizadas simulações com dois sistemas testes da literatura.

O primeiro teste foi realizado no sistema de 23 barras (Gomez et al. 2004; Lavorato et al. 2010; ROCHA et al. 2012) e o segundo, no sistema de 32 barras, que foi adaptado de (Goswami and Basu 1992).

Estes dois sistemas possuem características diferentes. Neste contexto, o sistema de 23 Barras possui mais opções de adição de circuitos por barramento, quando comparado com o outro. Assim, para cada iteração, haverá mais opções para o AHC especializado avaliar. Outra diferença é a distribuição das cargas nos barramentos dos dois sistemas. No sistema de 32 barras a distribuição das cargas não é uniforme, diferente da considerada no outro sistema. A expectativa é de avaliar como se dá o desempenho do algoritmo frente a estas diferenças.

Neste capítulo são apresentados os testes e os respectivos resultados através da simulação com estes dois sistemas. Para as simulações foi utilizado um Notebook PC Intel® Core™ i7 3632QM @2.20 GHz, 8 GB RAM.

### 5.2 Sistema 23 barras

Para o Sistema de 23 barras, inicialmente não há circuitos construídos, e existe a possibilidade de se construir 35 circuitos (existem 35 linhas candidatas a adição). A Figura

5.1 representa todas as possíveis conexões entre as linhas candidatas do sistema e a posição da subestação do sistema.

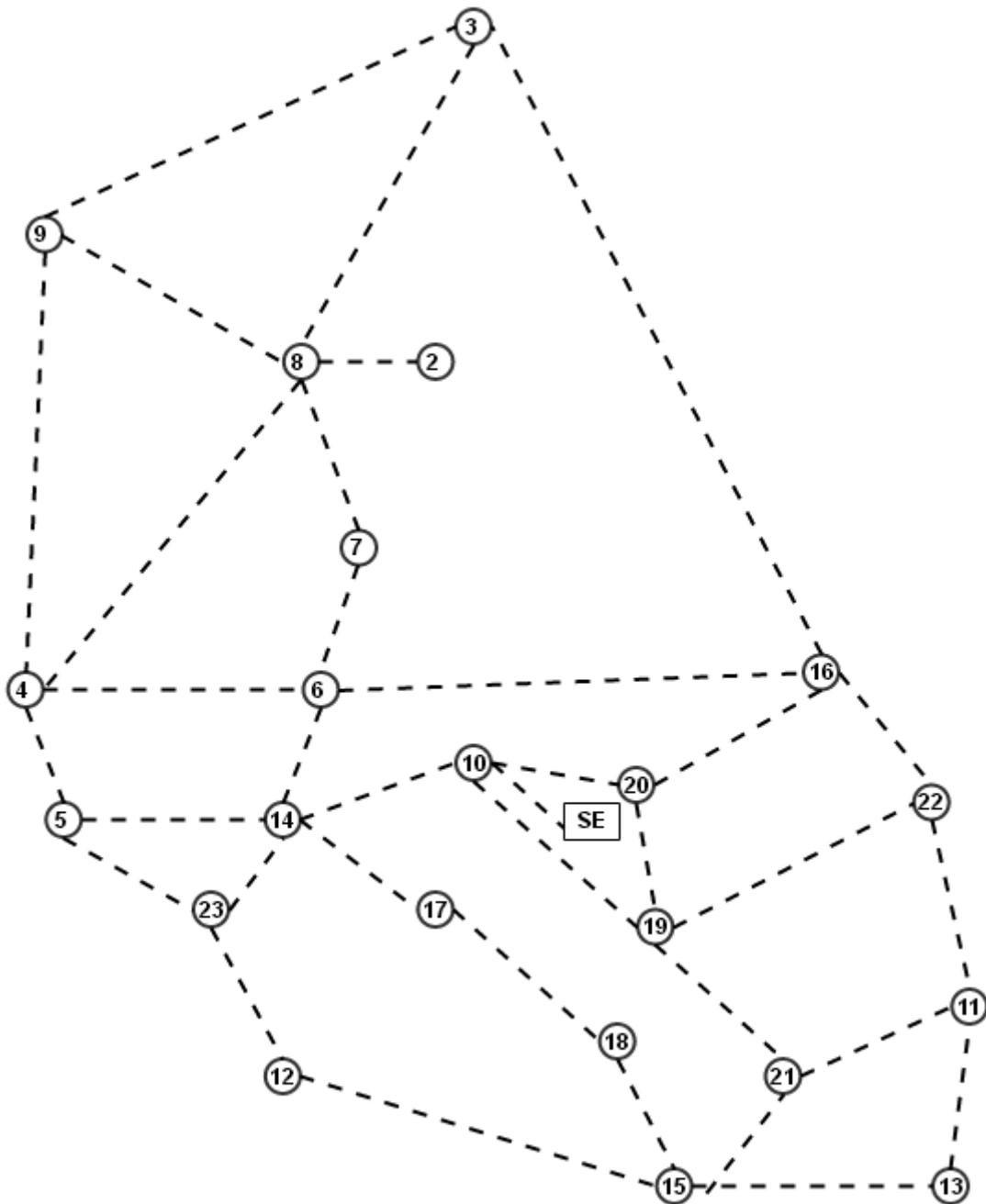


Figura 5.1: Sistema 23 Barras – Conexão de Linhas Candidatas

O sistema é alimentado com tensão de 34,5 kV, com a operação permitida entre 33,465kV e 35,535 kV.

Considerando a sua configuração, o sistema possui 21 barramentos com carga e uma subestação com capacidade de 10 MVA. Originalmente, o sistema conta com um barramento sem carga (barramento 2).

Existe a possibilidade de construção de dois tipos de linha: condutores de alumínio 1/0 e 4/0 com custos de construção (por quilometro) de 10k US\$/km e 40k US\$/km, respectivamente. As demandas, para os 21 barramentos de carga, foram consideradas com um fator de potência de 0,9.

Os dados para o sistema, apresentados a seguir, foram reproduzidos de (ROCHA et al. 2012; Lavorato 2010). A Tabela 5.1, Tabela 5.2 e Tabela 5.3 apresentam os dados de demanda, dos condutores e das linhas, respectivamente, para este sistema.

Tabela 5.1 Dados dos Barramentos

Barra	$S_D$ kVA	$S^0$ kVA	Barra	$S_D$ kVA	$S^0$ kVA
1	0,0	10000	13	320,0	-
2	0,0	-	14	320,0	-
3	640,0	-	15	320,0	-
4	320,0	-	16	320,0	-
5	320,0	-	17	320,0	-
6	320,0	-	18	320,0	-
7	320,0	-	19	320,0	-
8	320,0	-	20	320,0	-
9	320,0	-	21	320,0	-
10	320,0	-	22	320,0	-
11	320,0	-	23	320,0	-
12	320,0	-	-	-	-

Tabela 5.2 Dados dos Tipos de Condutores Disponíveis

Tipo	Capacidade A	Resistência $\Omega$ /km	Reatância $\Omega$ /km	Custo US\$/km
1/0	230	0,6045	0,429	10000
4/0	340	0,3017	0,402	40000

Tabela 5.3 Dados das Linhas

Barra De	Barra Para	Comp km	Barra De	Barra Para	Comp Km
1	10	0,20209	10	20	0,69728
2	8	0,07560	11	13	0,50527
3	8	2,70790	11	21	0,63941
3	9	1,82020	11	22	0,69245
3	16	4,22370	12	15	0,98085
4	5	0,94020	12	23	0,67855
4	6	1,50170	13	15	0,62291
4	8	2,30530	14	17	0,44821
4	9	3,44790	14	23	0,48604
5	14	1,01620	15	18	0,57114
5	23	0,64091	15	21	0,60687
6	7	0,81807	16	20	0,50185
6	14	0,81772	16	22	0,94829
6	16	1,17520	17	18	0,44113
7	8	0,68661	19	20	0,73027
8	9	2,05670	19	21	0,55500
10	14	0,42971	19	22	0,58266
10	19	0,59489			

Na Tabela 5.1, os símbolos SD e  $S^0$  representam as potências nos barramentos de demanda e de fornecimento (capacidade máxima), em kVA. Na

Tabela 5.3, a expressão Comp representa o comprimento da linha em km.

### 5.3 Resultados para o sistema de 23 barras

Como o problema é resolvido de forma iterativa, a maneira escolhida para a apresentação dos resultados obtidos foi a de mostrar a solução sendo construída passo-a-passo, ou iteração por iteração. A tolerância adotada para os cálculos da subrotina de fluxo de potência CA foi de  $1.10^{-8}$  (1,000E-8). Na sequência são apresentados os resultados obtidos pelo algoritmo considerando os dois indicadores de sensibilidade.

### 5.3.1 IS sem perdas

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos pelo AHC especializado, para solucionar o problema do Sistema de 23 barras, com o indicador de sensibilidade estabelecido por (4.1) e (4.2).

Os resultados foram os mesmos daqueles divulgados em (ROCHA et al. 2012) com a diferença de que o desempenho computacional foi muito melhor. A justificativa para o melhor desempenho está relacionada com o tipo de metodologia para o cálculo de fluxo de potência CA implementada na subrotina utilizada. Neste trabalho, ao invés de utilizar uma subrotina para o cálculo de fluxo de carga CA baseada no método de Newton Raphson, utilizou-se um método de varredura para determinação o fluxo de potência CA.

A Figura 5.2 apresentada na página 37 ilustra a configuração final encontrada pelo algoritmo. O tempo computacional gasto para a determinação desta configuração para o sistema teste foi de 0,055 segundos e esse tempo mostra o bom desempenho do algoritmo.

A Tabela 5.4 representa o conjunto dos circuitos identificados como interessantes e o escolhido, para cada iteração. Neste sistema, como o custo está relacionado diretamente com o comprimento do circuito, o denominador adotado para  $IS_n$  foi o comprimento do circuito.

Tabela 5.4 Resultados do Processo Iterativo

Iter	IE (Linhas Candidatas)	Linha. Esc.	Ação	Custo US\$
1	<b>IE<sub>01-10</sub> = 0,2020</b>	(01-10)	Construção	2020,9
2	<b>IE<sub>10-14</sub> = 82692,21</b> ; IE <sub>10-19</sub> = 59731,50 IE <sub>10-20</sub> = 50960,40	(10-14)	Construção	4297,1
3	IE <sub>05-14</sub> = 34963,11; IE <sub>06-14</sub> = 43449,48 IE <sub>10-19</sub> = 59729,26; IE <sub>10-20</sub> = 50958,49 <b>IE<sub>14-17</sub> = 79269,78</b> ; IE <sub>14-23</sub> = 73099,97	(14-17)	Construção	4482,1
4	IE <sub>05-14</sub> = 34959,01; IE <sub>06-14</sub> = 43444,39 IE <sub>10-19</sub> = 59727,02; IE <sub>10-20</sub> = 50956,59 IE <sub>14-23</sub> = 73091,41; <b>IE<sub>17-18</sub> = 80525,91</b>	(17-18)	Construção	4411,3
5	IE <sub>05-14</sub> = 34954,92; IE <sub>06-14</sub> = 43439,30 IE <sub>10-19</sub> = 59724,78; IE <sub>10-20</sub> = 50954,68 <b>IE<sub>14-23</sub> = 73082,84</b> ; IE <sub>15-18</sub> = 62178,06	(14-23)	Construção	4860,4
6	IE <sub>05-14</sub> = 34950,82; IE <sub>05-23</sub> = 55411,56 IE <sub>06-14</sub> = 43434,21; IE <sub>10-19</sub> = 59722,54 IE <sub>10-20</sub> = 50952,77; IE <sub>12-23</sub> = 52337,81 <b>IE<sub>15-18</sub> = 62170,76</b>	(15-18)	Construção	5711,4
7	IE <sub>05-14</sub> = 34946,72; IE <sub>05-23</sub> = 55405,05 IE <sub>06-14</sub> = 43429,11; <b>IE<sub>10-19</sub> = 59720,30</b> IE <sub>10-20</sub> = 50950,85; IE <sub>12-15</sub> = 36187,40 IE <sub>12-23</sub> = 52331,67; IE <sub>13-15</sub> = 56981,61	(10-19)	Construção	5948,9

	IE <sub>15-21</sub> = 58487,674			
8	IE <sub>05-14</sub> = 34945,41; IE <sub>05-23</sub> = 55402,98 IE <sub>06-14</sub> = 43427,48; IE <sub>10-20</sub> = 50948,95 IE <sub>12-15</sub> = 36186,05; IE <sub>12-23</sub> = 52329,70 IE <sub>13-15</sub> = 56979,47; IE <sub>15-21</sub> = 58485,48 IE <sub>19-20</sub> = 48641,96; <b>IE<sub>19-21</sub>= 64003,18</b> IE <sub>19-22</sub> = 60964,82	(19-21)	Construção	5550
9	IE <sub>05-14</sub> = 34944,10; IE <sub>05-23</sub> = 55400,90 IE <sub>06-14</sub> = 43425,86; IE <sub>10-20</sub> = 50947,04 IE <sub>11-21</sub> = 55540,04; IE <sub>12-15</sub> = 36184,69 IE <sub>12-23</sub> = 52327,74; IE <sub>13-15</sub> = 56977,33 IE <sub>19-20</sub> = 48634,77; <b>IE<sub>19-22</sub>= 60955,81</b>	(19-22)	Construção	5826,6
10	IE <sub>05-14</sub> = 34942,78; IE <sub>05-23</sub> = 55398,82 IE <sub>06-14</sub> = 43424,23; IE <sub>10-20</sub> = 50945,12 IE <sub>11-21</sub> = 55531,82; IE <sub>11-22</sub> = 51277,96 IE <sub>12-15</sub> = 36183,33; IE <sub>12-23</sub> = 52325,78 <b>IE<sub>13-15</sub>= 56975,19</b> ; IE <sub>16-22</sub> = 37443,63 IE <sub>19-20</sub> = 48627,57	(13-15)	Construção	6229,1
11	IE <sub>05-14</sub> = 34938,68; IE <sub>05-23</sub> = 55392,31 IE <sub>06-14</sub> = 43419,12; IE <sub>10-20</sub> = 50943,21 <b>IE<sub>11-13</sub>= 70205,04</b> ; IE <sub>11-21</sub> = 55529,73 IE <sub>11-22</sub> = 51276,03; IE <sub>12-15</sub> = 36169,25 IE <sub>12-23</sub> = 52319,63; IE <sub>16-22</sub> = 37442,22 IE <sub>19-20</sub> = 48625,75	(11-13)	Construção	5052,7
12	IE <sub>05-14</sub> = 34934,57; <b>IE<sub>05-23</sub>= 55385,79</b> IE <sub>06-14</sub> = 43414,02; IE <sub>10-20</sub> = 50941,29 IE <sub>12-15</sub> = 36155,15; IE <sub>12-23</sub> = 52313,47 IE <sub>16-22</sub> = 37440,81; IE <sub>19-20</sub> = 48623,92	(05-23)	Construção	6409,1
13	IE <sub>04-05</sub> = 37742,72; IE <sub>06-14</sub> = 43408,92 IE <sub>10-20</sub> = 50939,38; IE <sub>12-15</sub> = 36150,90 <b>IE<sub>12-23</sub>= 52302,61</b> ; IE <sub>16-22</sub> = 37439,41 IE <sub>19-20</sub> = 48622,09	(12-23)	Construção	6785,5
14	IE <sub>04-05</sub> = 37734,88; IE <sub>06-14</sub> = 43403,82 <b>IE<sub>10-20</sub>= 50937,47</b> ; IE <sub>16-22</sub> = 37438,00 IE <sub>19-20</sub> = 48620,26	(10-20)	Construção	6972,8
15	IE <sub>04-05</sub> = 37733,46; IE <sub>06-14</sub> = 43402,19 <b>IE<sub>16-20</sub>= 70761,69</b> ; IE <sub>16-22</sub> = 37436,59	(16-20)	Construção	5018,5
16	IE <sub>03-16</sub> = 08405,55; IE <sub>04-05</sub> = 37732,04 <b>IE<sub>06-14</sub>= 43400,57</b> ; IE <sub>06-16</sub> = 30209,77	(06-14)	Construção	8177,2
17	IE <sub>03-16</sub> = 08405,23; IE <sub>04-05</sub> = 37727,60 IE <sub>04-06</sub> = 23626,52; <b>IE<sub>06-07</sub>= 43370,30</b>	(06-07)	Construção	8180,7
18	IE <sub>03-16</sub> = 08404,92; IE <sub>04-05</sub> = 37723,16 IE <sub>04-06</sub> = 23620,15; <b>IE<sub>07-08</sub>= 51652,29</b>	(07-08)	Construção	6866,1
19	<b>IE<sub>02-08</sub>= 468855,3</b> ; IE <sub>03-08</sub> = 13089,65 IE <sub>03-16</sub> = 08404,60; IE <sub>04-05</sub> = 37718,71 IE <sub>04-06</sub> = 23613,77; IE <sub>04-08</sub> = 15375,64 IE <sub>08-09</sub> = 17234,14	(02-08)	Construção	756
20	IE <sub>03-08</sub> = 13089,65; IE <sub>03-16</sub> = 08404,60 <b>IE<sub>04-05</sub>= 37718,71</b> ; IE <sub>04-06</sub> = 23613,77 IE <sub>04-08</sub> = 15375,64; IE <sub>08-09</sub> = 17234,14	(04-05)	Construção	9402
21	IE <sub>03-08</sub> = 13088,11; IE <sub>03-16</sub> = 08404,28 IE <sub>04-09</sub> = 10280,26; <b>IE<sub>08-09</sub>= 17232,11</b>	(08-09)	Construção	20567
22	IE <sub>03-08</sub> = 13080,89; <b>IE<sub>03-09</sub>= 19452,89</b> IE <sub>03-16</sub> = 08403,97	(03-09)	Construção	18202
23	-	-	-	-

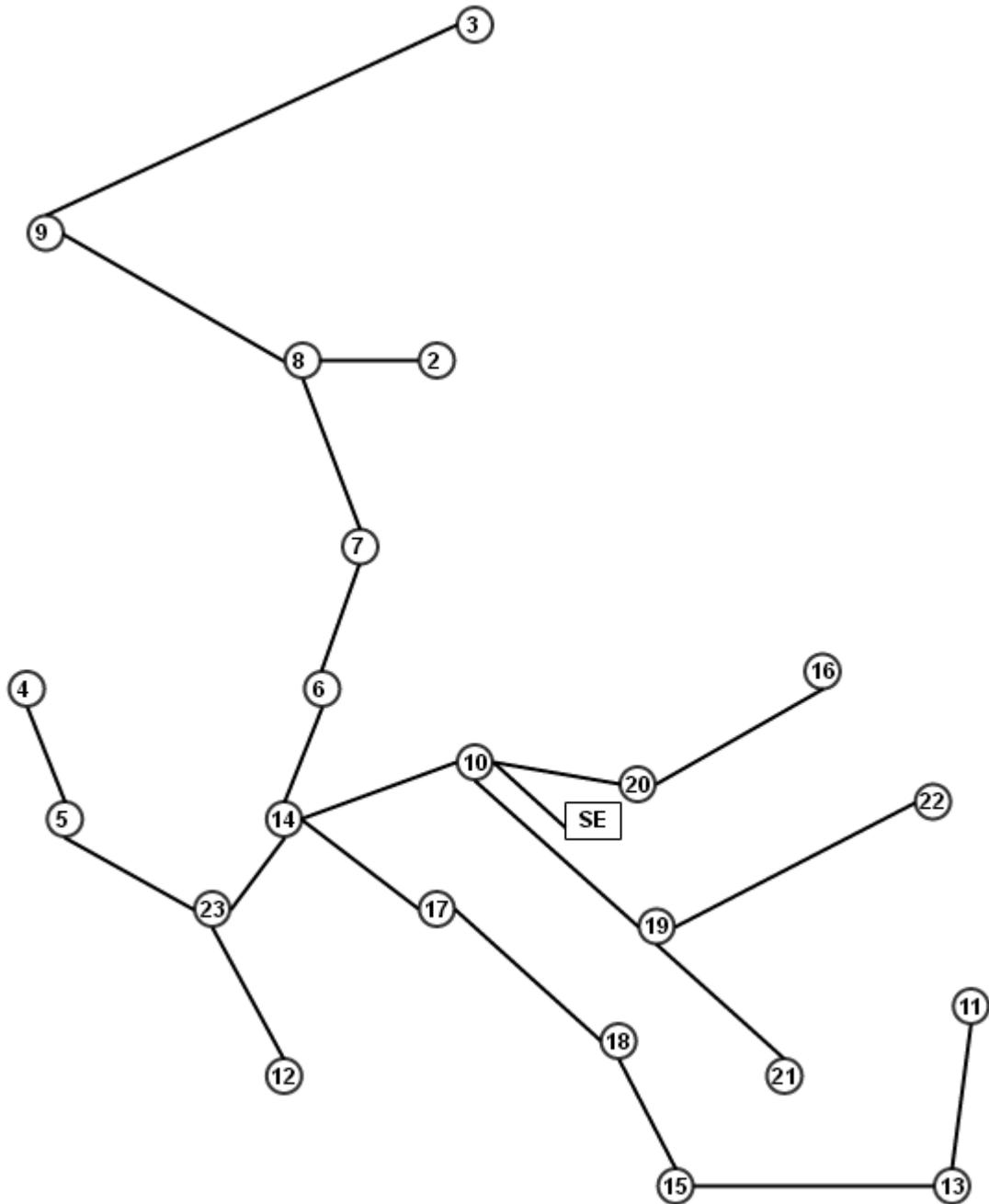


Figura 5.2: Configuração Final 23 Barras IS sem perda

Para ilustrar a quantidade de recursos (custo, custo acumulado e a quantidade da demanda atendida), durante a dinâmica de conexão dos barramentos no processo iterativo, é apresentado o gráfico da Figura 5.3.

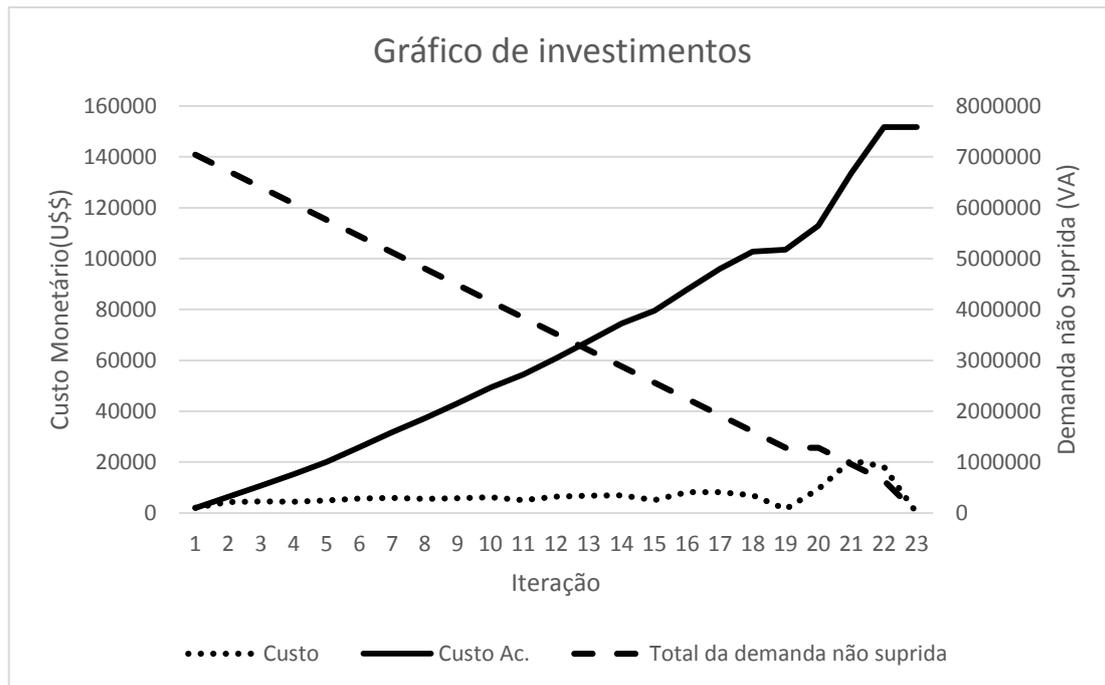


Figura 5.3 Gráfico de investimentos

A Tabela 5.5 faz uma comparação, considerando-se o custo de adição de circuitos, para resultados já apresentados para a solução deste problema.

Tabela 5.5 Comparação com Resultados de outros Algoritmos

Soluções	Custo de Construção de Circuitos (US\$)
Algoritmo apresentado em (Gomez et al. 2004)	151892
Algoritmo apresentado em (Nahman and Peric 2008)	151892
Algoritmo apresentado em (Lavorato et al. 2010)	151892
Algoritmo apresentado em (ROCHA et al. 2012)	151727
AHC-S	151727

### 5.3.2 IS com perdas

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos pelo AHC especializado, para solucionar o problema do Sistema de 23 barras, com o indicador de sensibilidade estabelecido por (4.3) e (4.4).

Com a troca do IS, utilizando agora aquele que além de considerar o valor da tensão no barramento de conexão e o custo do circuito, considera também as perdas elétricas obtidas com a simulação da entrada do respectivo circuito candidato, observou-se uma pequena diferença na configuração final obtida para o sistema.

Comparando-se as configurações finais, a única diferença foi a troca do circuito 15-11 pelo circuito 21-11. Essa diferença pode ser vista na Figura 5.4, comparando-se com o contido na Figura 5.2.

O tempo computacional gasto foi de 3,7 segundos. Nota-se uma diferença no tempo computacional, que está relacionada com o maior acionamento da subrotina para o cálculo de fluxo de potência CA. Agora esta é acionada não somente uma vez para cada iteração e sim tantas vezes quanto forem necessárias para a determinação de  $T_{perd_n}$ . Assim, para cada circuito candidato a adição da respectiva iteração, há a necessidade de simular a sua entrada no sistema e realizar o cálculo de fluxo de potência CA (ou seja, há a necessidade de acionar a subrotina).

Com essa alteração no resultado o algoritmo produziu um resultado idêntico ao dos trabalhos de (Gomez et al. 2004; Nahman and Peric 2008; Lavorato et al. 2010) estabelecendo um custo de construção de circuitos de US\$ 151892 como pode ser visto na Tabela 5.5.

Nestes trabalhos, além do custo de construção de circuitos estavam presentes na função objetivo também os custos operacionais do sistema (perdas elétricas), sendo este o melhor resultado conhecido para estas condições.

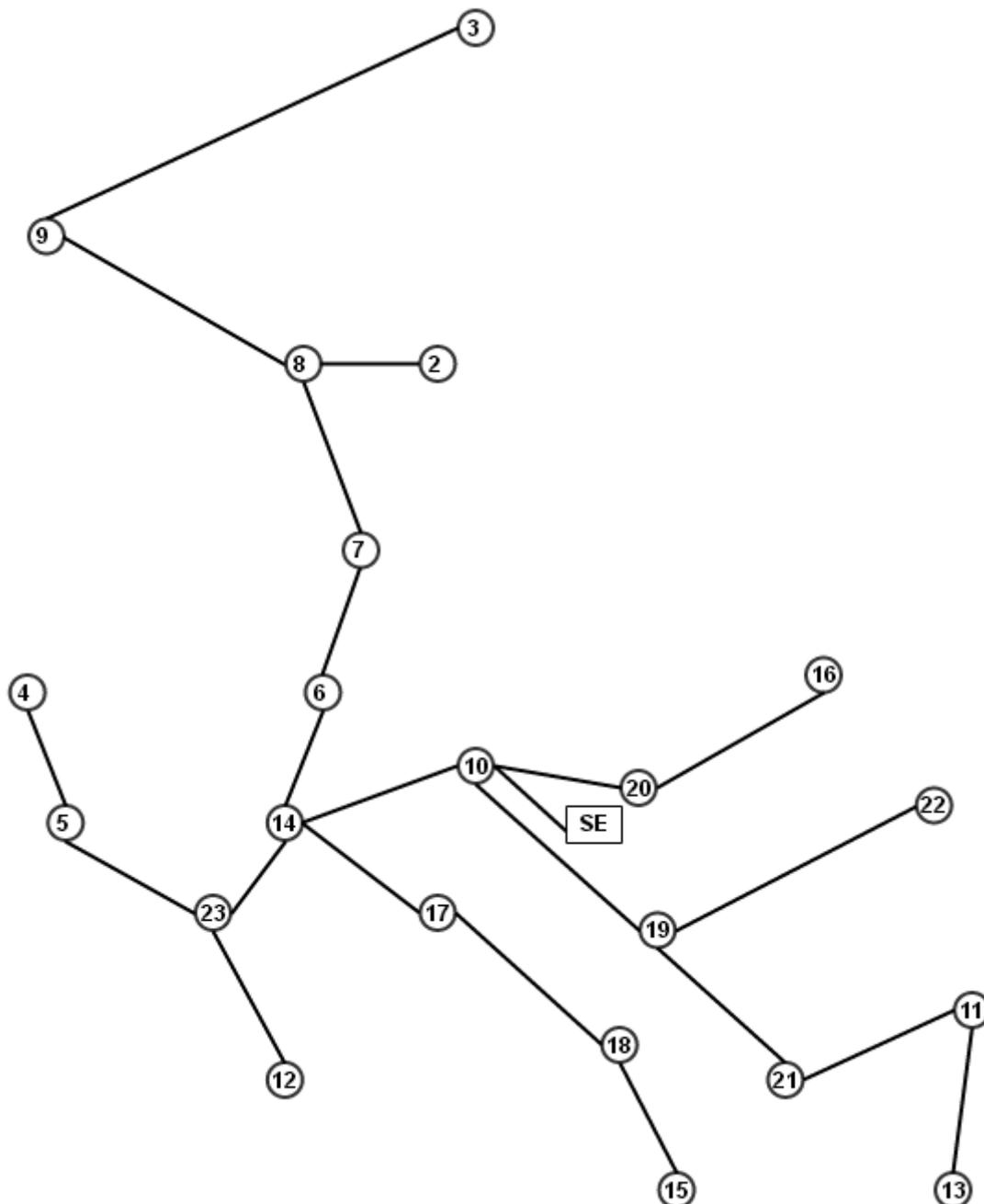


Figura 5.4 Configuração final 23 barras com perda

A Tabela 5.6 representa o conjunto dos circuitos identificados como interessantes e o escolhido, para cada iteração. A ordem de construção de circuitos varia um pouco com relação ao apresentado pela Tabela 5.4, pois o indicador de sensibilidade é diferente e por esse motivo a tomada de decisão do algoritmo não necessariamente será a mesma.

As perdas elétricas para esta configuração do sistema foram menores do que a configuração estabelecida pelo IS anterior. As perdas elétricas calculadas para esta

configuração foram de 15,491 kW, enquanto as perdas elétricas calculadas para a configuração obtida pelo outro IS foram de 16,921 kW.

Tabela 5.6 Resultado do Processo Iterativo

Iter	IE (Linhas Candidatas)	Linha. Esc.	Ação	Custo US\$
1	<b>IE<sub>01-10</sub> = 0,2020</b>	(01-10)	Construção	2020,9
2	<b>IE<sub>10-14</sub> = 1362147,192</b> IE <sub>10-19</sub> = 868063,364 IE <sub>10-20</sub> = 690209,388	(10-14)	Construção	4297,1
3	IE <sub>05-14</sub> = 156509,583 IE <sub>06-14</sub> = 203371,541 <b>IE<sub>10-19</sub> = 428351,968</b> IE <sub>10-20</sub> = 352742,771 IE <sub>14-17</sub> = 405464,149 IE <sub>14-23</sub> = 370387,229	(10-19)	Construção	5948,9
4	IE <sub>05-14</sub> = 108586,022 IE <sub>06-14</sub> = 139155,637 IE <sub>10-20</sub> = 209670,022 <b>IE<sub>14-17</sub> = 269541,524</b> IE <sub>14-23</sub> = 247002,218 IE <sub>19-20</sub> = 146416,126 IE <sub>19-21</sub> = 197778,885 IE <sub>19-28</sub> = 187602,514	(14-17)	Construção	4482,1
5	IE <sub>05-14</sub> = 42657,532 IE <sub>06-14</sub> = 82130,757 IE <sub>10-20</sub> = 129040,746 IE <sub>14-23</sub> = 142569,940; IE <sub>19-20</sub> = 95995,080 IE <sub>19-21</sub> = 128493,631 IE <sub>19-22</sub> = 122060,873	(14-23)	Construção	4860,4
6	IE <sub>05-14</sub> = 42657,532 IE <sub>05-23</sub> = 63503,878 IE <sub>06-14</sub> = 53650,402 IE <sub>10-20</sub> = 77677,439 IE <sub>12-23</sub> = 59854,252 IE <sub>17-18</sub> = 93922,579 IE <sub>19-20</sub> = 65277,298 IE <sub>19-21</sub> = 86896,119 IE <sub>19-22</sub> = 82618,574	(17-18)	Construção	4411,3
7	IE <sub>05-14</sub> = 28502,631; IE <sub>05-23</sub> = 43307,295 IE <sub>06-14</sub> = 35705,157 IE <sub>10-20</sub> = 49931,519 IE <sub>12-23</sub> = 40845,853 IE <sub>15-18</sub> = 45059,182 IE <sub>19-20</sub> = 43835,484 <b>IE<sub>19-21</sub> = 58129,975</b> IE <sub>19-22</sub> = 55302,169	(19-21)	Construção	5550,0
8	IE <sub>05-14</sub> = 23456,300 IE <sub>05-23</sub> = 35904,233 IE <sub>06-14</sub> = 29341,979 IE <sub>10-20</sub> = 39675,958 IE <sub>11-21</sub> = 36798,982; IE <sub>12-23</sub> = 33871,918 IE <sub>15-18</sub> = 37826,081 IE <sub>15-21</sub> = 38813,298 IE <sub>19-20</sub> = 33966,131 <b>IE<sub>19-22</sub> = 42787,923</b>	(19-22)	Construção	5826,6
9	IE <sub>05-14</sub> = 19061,048 IE <sub>05-23</sub> = 29366,280 IE <sub>06-14</sub> = 23814,455 <b>IE<sub>10-20</sub> = 31302,200</b> IE <sub>11-21</sub> = 29053,828 IE <sub>11-22</sub> = 26734,560 IE <sub>12-23</sub> = 27710,084 IE <sub>15-18</sub> = 31285,459 IE <sub>15-21</sub> = 30637,357 IE <sub>16-22</sub> = 19394,425 IE <sub>19-20</sub> = 26516,288	(10-20)	Construção	6972,8
10	IE <sub>05-14</sub> = 16994,863 IE <sub>05-23</sub> = 26263,296 IE <sub>06-14</sub> = 21220,710 IE <sub>11-21</sub> = 26019,353 IE <sub>11-22</sub> = 23951,038 IE <sub>12-23</sub> = 24784,667 IE <sub>15-18</sub> = 28129,465 IE <sub>15-21</sub> = 27435,094 IE <sub>16-20</sub> = 36414,994 IE <sub>16-22</sub> = 17386,930	(16-20)	Construção	5018,5
11	IE <sub>03-16</sub> = 2198,293 IE <sub>05-14</sub> = 14607,968 IE <sub>06-14</sub> = 18228,100 IE <sub>06-16</sub> = 12306,201 IE <sub>11-21</sub> = 22480,254 IE <sub>11-22</sub> = 20702,066 IE <sub>12-23</sub> = 21382,047 IE <sub>15-18</sub> = 24416,808 IE <sub>15-21</sub> = 23701,009	(15-18)	Construção	5711,4

12	IE <sub>03-16</sub> = 1882,135 IE <sub>05-14</sub> = 11430,808 IE <sub>05-23</sub> = 17811,862 IE <sub>06-14</sub> = 14250,897 IE <sub>06-16</sub> = 9817,960 <b>IE<sub>11-21</sub>= 17956,696</b> IE <sub>11-22</sub> = 16545,320 IE <sub>12-15</sub> = 10632,227 IE <sub>12-23</sub> = 16813,792 IE <sub>13-15</sub> = 16829,205	(11-21)	Construção	6394,1
13	IE <sub>03-16</sub> = 1663,583 IE <sub>05-14</sub> = 9643,140 IE <sub>05-23</sub> = 15066,616 IE <sub>06-14</sub> = 12016,173 IE <sub>06-16</sub> = 8291,276 <b>IE<sub>11-13</sub>= 18196,494</b> IE <sub>12-15</sub> = 9114,338 IE <sub>12-23</sub> = 14223,678 IE <sub>13-15</sub> = 14415,881	(11-13)	Construção	5052,7
14	IE <sub>03-16</sub> = 1434,178 IE <sub>05-14</sub> = 7920,318 <b>IE<sub>05-23</sub>= 12406,973</b> IE <sub>06-14</sub> = 9864,628 IE <sub>06-16</sub> = 6816,918 IE <sub>12-15</sub> = 7604,414 IE <sub>12-23</sub> = 11713,876	(05-23)	Construção	6409,1
15	IE <sub>03-16</sub> = 1292,097 IE <sub>04-05</sub> = 7137,175; IE <sub>06-14</sub> = 8566,169 IE <sub>06-16</sub> = 5975,146 IE <sub>12-15</sub> = 6668,917 <b>IE<sub>12-23</sub>= 10096,22</b>	(12-23)	Construção	6785,5
16	IE <sub>03-16</sub> = 1157,454 IE <sub>04-05</sub> = 6170,803 <b>IE<sub>06-14</sub>= 7414,237</b> IE <sub>06-16</sub> = 5215,348	(06-14)	Construção	8177,2
17	IE <sub>03-16</sub> = 1054,864 IE <sub>04-05</sub> = 5513,384 IE <sub>04-06</sub> = 3511,266 <b>IE<sub>06-07</sub>= 6477,99</b>	(06-07)	Construção	8180,7
18	IE <sub>03-16</sub> = 948,894 IE <sub>04-05</sub> = 4864,512 IE <sub>04-06</sub> = 3059,039 <b>IE<sub>07-08</sub>= 6619,981</b>	(07-08)	Construção	6866,1
19	<b>IE<sub>02-08</sub>= 60090,552</b> IE <sub>03-08</sub> = 1144,508 IE <sub>03-16</sub> = 840,000 IE <sub>04-05</sub> = 4226,182 IE <sub>04-06</sub> = 2631,740 IE <sub>04-08</sub> = 1650,206 IE <sub>08-09</sub> = 1852,126	(02-08)	Construção	756
20	IE <sub>03-08</sub> = 1144,508 IE <sub>03-16</sub> = 840,000 <b>IE<sub>04-05</sub>= 4226,182</b> IE <sub>04-06</sub> = 2631,740 IE <sub>04-08</sub> = 1650,206 IE <sub>08-09</sub> = 1852,126	(04-05)	Construção	9402
21	IE <sub>03-08</sub> = 1031,720 IE <sub>03-16</sub> = 752,504 IE <sub>04-09</sub> = 980,344 <b>IE<sub>08-09</sub>= 1642,630</b>	(08-09)	Construção	20567
22	IE <sub>03-08</sub> = 881,329 <b>IE<sub>03-09</sub>= 1255,970</b> IE <sub>03-16</sub> = 657,864	(03-09)	Construção	18202
23	-	-	-	-

Para ilustrar a quantidade de recursos (custo, custo acumulado e a quantidade da demanda atendida), durante a dinâmica de conexão dos barramentos no processo iterativo, é apresentado o gráfico da Figura 5.5.

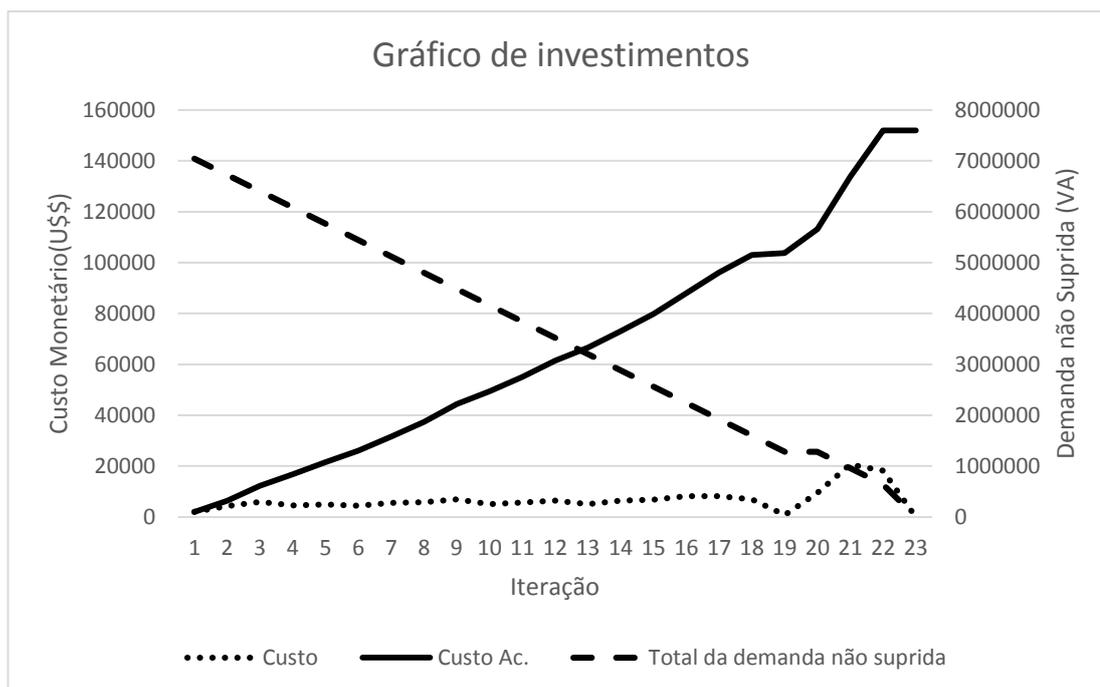


Figura 5.5 Gráfico Investimentos

## 5.4 Sistema 32 Barras

Este sistema foi adaptado de (Goswami and Basu 1992). Originalmente este sistema possuía 32 circuitos construídos e 5 circuitos de interconexão. Com a adaptação, foi considerado que inicialmente o sistema não possuía nenhum circuito construído com a possibilidade de adicionar os dois tipos de linhas apresentados no sistema anterior Tabela 5.2.

Com a adaptação, o sistema passou a ter 37 circuitos candidatos à construção, sendo representados através da Figura 5.6.

Também foi considerado que o sistema é alimentado com tensão de 34,5 kV, com a operação permitida entre 33,465kV e 35,535 kV.

As demandas para os 31 barramentos de carga não são uniformes. Outra diferença com relação ao sistema teste anterior é que existem menos opções de circuitos candidatos à adição por barramento.



A Tabela 5.7 e a Tabela 5.8 apresentam os dados dos barramentos e das linhas, respectivamente.

Na Tabela 5.7, os símbolos  $S_D$  e  $S^0$  representam as potências nos barramentos de demanda e de fornecimento (capacidade máxima), em kVA. Na Tabela 5.8, a expressão Comp representa o comprimento da linha em km.

Tabela 5.7 Dados dos Barramentos

Barra	$S_D$ kVA	$S^0$ kVA	Barra	$S_D$ kVA	$S^0$ kVA
SE	00.0	10000	17	98,489	-
1	116,620	-	18	98,489	-
2	98,489	-	19	98,489	-
3	144,220	-	20	98,489	-
4	67,082	-	21	98,489	-
5	63,246	-	22	102,960	-
6	223,610	-	23	465,190	-
7	223,610	-	24	465,190	-
8	63,246	-	25	65,000	-
9	63,246	-	26	65,000	-
10	54,083	-	27	63,246	-
11	69,462	-	28	138,920	-
12	69,462	-	29	632,460	-
13	144,220	-	30	165,530	-
14	60,828	-	31	232,590	-
15	63,246	-	32	72,111	-
16	63,246	-	-	-	-

Tabela 5.8 Dados das Linhas

Barra De	Barra Para	Comp km	Barra De	Barra Para	Comp Km
0	1	0,1396	19	20	0,8495
1	2	0,7464	20	21	1,5834
2	3	0,5541	2	22	0,7372
3	4	0,5770	22	23	1,5436
4	5	1,4596	23	24	1,5348
5	6	0,8722	5	25	0,3073
6	7	1,0108	25	26	0,4302
7	8	1,7110	26	27	1,9047
8	9	1,7263	27	28	1,4389

9	10	0,2793
10	11	0,5320
11	12	2,5199
12	13	1,2078
13	14	1,0673
14	15	1,2467
15	16	2,9008
16	17	1,2549
1	18	0,3058
18	19	2,7315

28	29	0,7683
29	30	1,8482
30	31	0,6433
31	32	0,8504
7	33	3,8157
8	34	3,8157
11	35	3,8157
17	36	0,9539
24	37	0,9539

## 5.5 Resultados para o sistema de 32 barras

Para esse sistema o resultado também é apresentado passo a passo, ou seja, iteração por iteração. A tolerância adotada para os cálculos da rotina de fluxo CA também foi de  $1.10^{-8}$  (1,000E-8), a mesma utilizada para o sistema de 23 barras.

Na sequência são apresentados os resultados obtidos pelo algoritmo considerando os dois indicadores de sensibilidade.

### 5.5.1 IS sem perdas

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos pelo AHC especializado, para solucionar o problema do Sistema de 32 barras, com o indicador de sensibilidade estabelecido por (4.1) e (4.2).

O algoritmo estabeleceu uma configuração de boa qualidade. Originalmente, o sistema de (Goswami and Basu 1992), desconsiderando as linhas de interconexão, tem um custo de US\$ 372847,00. A configuração obtida pelo algoritmo possui um custo menor, de US\$ 343851,00.

A Tabela 5.9 representa o conjunto dos circuitos identificados como interessantes e o escolhido, para cada iteração. Neste sistema, como o custo está relacionado diretamente com o comprimento do circuito, o denominador adotado para  $IS_n$  foi o comprimento do circuito.

Tabela 5.9 Resultados do Processo Iterativo

Iter	IE (Linhas Candidatas)	Linha. Esc.	Ação	Custo US\$
1	<b>IE<sub>01-01</sub> = 0,140</b>	(00-01)	Construção	1396,0
2	IE <sub>01-02</sub> = 47608,072 <b>IE<sub>01-18</sub> = 116202,306</b>	(01-18)	Construção	3058,0
3	<b>IE<sub>01-02</sub> = 47607,693</b> IE <sub>18-19</sub> = 13008,883	(01-02)	Construção	7464,0
4	<b>IE<sub>02-03</sub> = 64126,668</b> IE <sub>02-22</sub> = 48199,385 IE <sub>18-19</sub> = 13008,779	(02-03)	Construção	5541,0
5	IE <sub>02-22</sub> = 48195,819 <b>IE<sub>03-04</sub> = 61574,200</b> IE <sub>18-19</sub> = 13008,627	(03-04)	Construção	5770,0
6	<b>IE<sub>02-22</sub> = 48194,159</b> IE <sub>04-05</sub> = 24339,222 IE <sub>18-19</sub> = 13008,627	(02-22)	Construção	7372,0
7	<b>IE<sub>04-05</sub> = 24337,936</b> IE <sub>18-19</sub> = 13008,448 IE <sub>22-23</sub> = 23014,573	(04-05)	Construção	14596,00
8	IE <sub>05-06</sub> = 40723,601 IE <sub>18-19</sub> = 13008,382 <b>IE<sub>05-25</sub> = 115584,525</b> IE <sub>22-23</sub> = 23013,826	(05-25)	Construção	3073,0
9	IE <sub>05-06</sub> = 40718,266 IE <sub>18-19</sub> = 13008,313 IE <sub>22-23</sub> = 23013,057 <b>IE<sub>25-26</sub> = 82553,441</b>	(25-26)	Construção	4302,0
10	<b>IE<sub>05-06</sub> = 40712,929</b> IE <sub>18-19</sub> = 13008,245 IE <sub>22-23</sub> = 23012,289 IE <sub>26-27</sub> = 18642,526	(05-06)	Construção	8722,0
11	<b>IE<sub>06-07</sub> = 35110,583</b> IE <sub>18-19</sub> = 13008,009 IE <sub>22-23</sub> = 23009,643 IE <sub>26-27</sub> = 18634,113	(06-07)	Construção	10108,0
12	IE <sub>07-08</sub> = 20727,675 IE <sub>18-19</sub> = 13007,774 <b>IE<sub>22-23</sub> = 23006,993</b> IE <sub>26-27</sub> = 18625,990 IE <sub>07-20</sub> = 9294,507	(22-23)	Construção	15436,0
13	IE <sub>07-08</sub> = 20722,702 IE <sub>18-19</sub> = 13007,283 <b>IE<sub>24-28</sub> = 37150,735</b> IE <sub>26-27</sub> = 18621,224 IE <sub>07-20</sub> = 9292,227	(23-24)	Construção	15348,0
14	IE <sub>07-08</sub> = 20717,718 IE <sub>18-19</sub> = 13006,792 <b>IE<sub>24-28</sub> = 23119,122</b> IE <sub>26-27</sub> = 18616,748 IE <sub>07-20</sub> = 9290,043	(24-28)	Construção	9539,0
15	IE <sub>07-08</sub> = 20716,227 IE <sub>18-19</sub> = 13006,645 IE <sub>26-27</sub> = 18615,410 <b>IE<sub>28-29</sub> = 46107,186</b> IE <sub>07-20</sub> = 9289,374 IE <sub>27-28</sub> = 24617,308	(28-29)	Construção	7683,0
16	IE <sub>07-08</sub> = 20709,419 IE <sub>18-19</sub> = 13005,974 IE <sub>26-27</sub> = 18609,296 <b>IE<sub>27-28</sub> = 24565,768</b> IE <sub>07-20</sub> = 9286,327 IE <sub>29-30</sub> = 19120,026	(27-28)	Construção	14389,0
17	<b>IE<sub>07-08</sub> = 20708,737</b> IE <sub>18-19</sub> = 13005,907 IE <sub>29-30</sub> = 19116,003 IE <sub>07-20</sub> = 9286,015	(07-08)	Construção	17110,0
18	IE <sub>07-20</sub> = 9284,179 <b>IE<sub>08-09</sub> = 20519,845</b> IE <sub>18-19</sub> = 13005,840 IE <sub>29-30</sub> = 19115,373 IE <sub>08-14</sub> = 9283,594	(08-09)	Construção	17263,0
19	IE <sub>07-20</sub> = 9282,341 IE <sub>08-14</sub> = 9281,170 IE <sub>18-19</sub> = 13005,773 IE <sub>29-30</sub> = 19114,742 <b>IE<sub>09-10</sub> = 126788,070</b>	(09-10)	Construção	2793,0
20	IE <sub>07-20</sub> = 9280,769 IE <sub>08-14</sub> = 9279,097 IE <sub>18-19</sub> = 13005,716 IE <sub>29-30</sub> = 19114,203 <b>IE<sub>10-11</sub> = 66544,654</b>	(10-11)	Construção	5320,0
21	IE <sub>07-20</sub> = 9278,748 IE <sub>08-14</sub> = 9276,432 IE <sub>18-19</sub> = 13005,642 <b>IE<sub>29-30</sub> = 19113,509</b> IE <sub>11-12</sub> = 14043,392 IE <sub>11-21</sub> = 9274,299	(29-30)	Construção	18482,0

22	IE <sub>07-20</sub> = 9277,945 IE <sub>08-14</sub> = 9275,629 IE <sub>18-19</sub> = 13005,466 <b>IE<sub>30-31</sub>= 54868,844</b> IE <sub>11-12</sub> = 14042,176 IE <sub>11-21</sub> = 9273,496	(30-31)	Construção	6433,0
23	IE <sub>07-20</sub> = 9276,815 IE <sub>08-14</sub> = 9274,499 IE <sub>18-19</sub> = 13005,218 <b>IE<sub>31-32</sub>= 41455,728</b> IE <sub>11-12</sub> = 14040,464 IE <sub>11-21</sub> = 9272,366	(31-32)	Construção	8504,0
24	IE <sub>07-20</sub> = 9276,464 IE <sub>08-14</sub> = 9274,148 IE <sub>18-19</sub> = 13005,140 <b>IE<sub>17-32</sub>= 36942,311</b> IE <sub>11-12</sub> = 14039,932 IE <sub>11-21</sub> = 9272,014	(17-32)	Construção	9539,0
25	IE <sub>07-20</sub> = 9275,984 IE <sub>08-14</sub> = 9272,668 IE <sub>18-19</sub> = 13005,035 <b>IE<sub>16-17</sub>= 28063,789</b> IE <sub>11-12</sub> = 14039,205 IE <sub>11-21</sub> = 9271,534	(16-17)	Construção	12549,0
26	IE <sub>07-20</sub> = 9273,359 IE <sub>08-14</sub> = 9273,359 IE <sub>18-19</sub> = 13004,967 IE <sub>15-16</sub> = 12135,081 <b>IE<sub>11-12</sub>= 14038,738</b> IE <sub>11-21</sub> = 9271,226	(11-12)	Construção	25199,0
27	IE <sub>07-20</sub> = 9273,652 IE <sub>08-14</sub> = 9270,691 IE <sub>18-19</sub> = 13004,894 IE <sub>15-16</sub> = 12134,637 <b>IE<sub>12-13</sub>= 29275,350</b> IE <sub>11-21</sub> = 9267,601	(12-13)	Construção	12078,0
28	IE <sub>07-20</sub> = 9269,444 IE <sub>08-14</sub> = 9265,141 IE <sub>18-19</sub> = 13004,740 IE <sub>15-16</sub> = 12133,713 <b>IE<sub>13-14</sub>= 33091,799</b> IE <sub>11-21</sub> = 9260,064	(13-14)	Construção	10673,0
29	IE <sub>07-20</sub> = 9267,666 IE <sub>08-14</sub> = 9256,880 IE <sub>18-19</sub> = 13004,675 IE <sub>15-16</sub> = 12133,323 <b>IE<sub>14-15</sub>= 12133,323</b> IE <sub>11-21</sub> = 9256,880	(14-15)	Construção	12467,0
30	IE <sub>07-20</sub> = 9265,815 <b>IE<sub>18-19</sub>= 13004,608</b> IE <sub>11-21</sub> = 9253,565	(18-19)	Construção	27315,0
31	IE <sub>07-20</sub> = 9265,741 <b>IE<sub>19-20</sub>= 41807,705</b> IE <sub>11-21</sub> = 9253,491	(19-20)	Construção	8495,0
32	<b>IE<sub>20-21</sub>= 22424,833</b> IE <sub>11-21</sub> = 9253,416	(20-21)	Construção	15834,0

Essa configuração final pode ser observada na Figura 5.7. O tempo computacional para se obter esta configuração para o sistema foi de 11,0 segundos, um tempo bastante reduzido pelo tamanho do sistema.

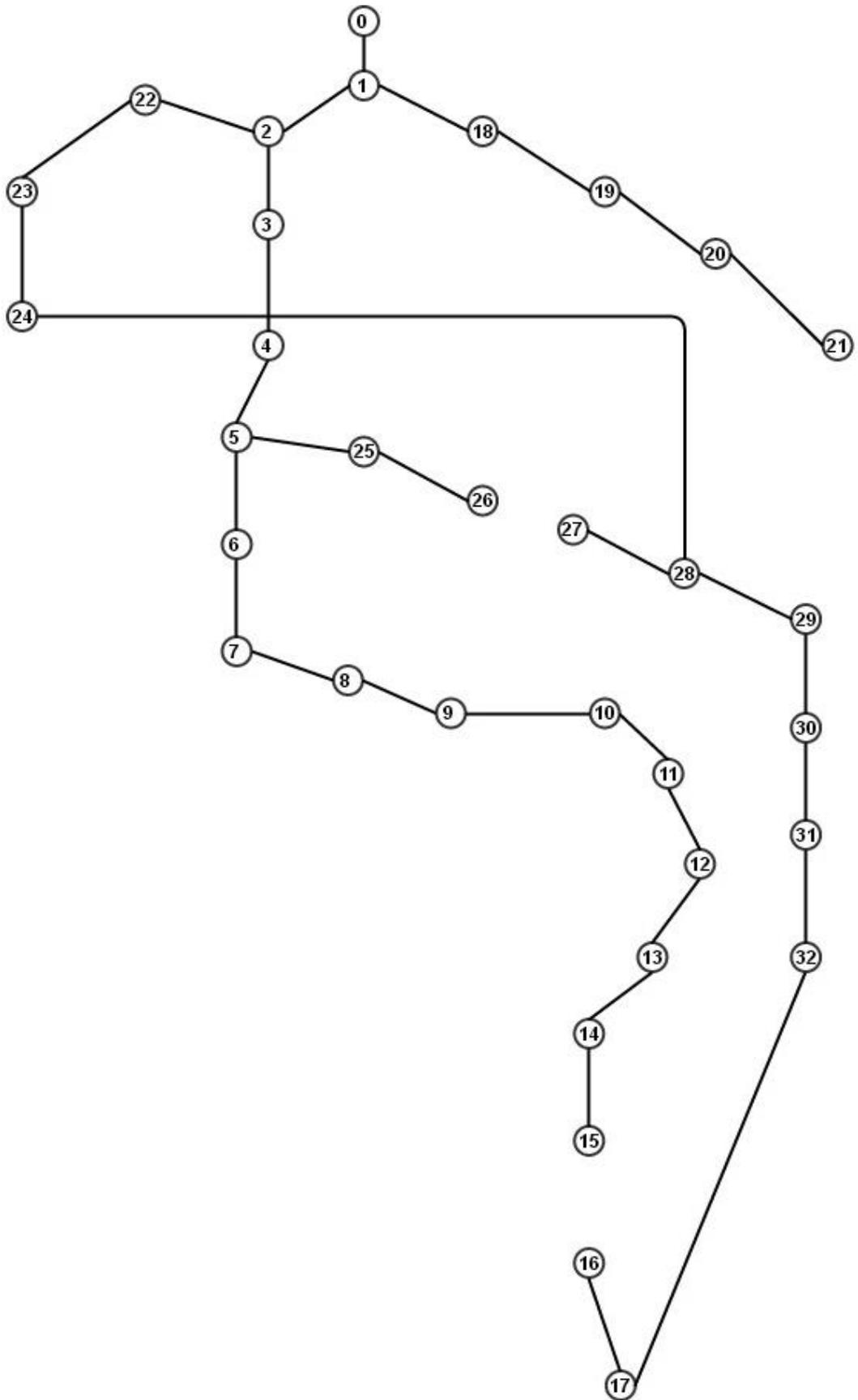


Figura 5.7 Configuração Final IS sem perdas

Para ilustrar a quantidade de recursos (custo, custo acumulado e a quantidade da demanda atendida), durante a dinâmica de conexão dos barramentos no processo iterativo, é apresentado o gráfico da Figura 5.8.

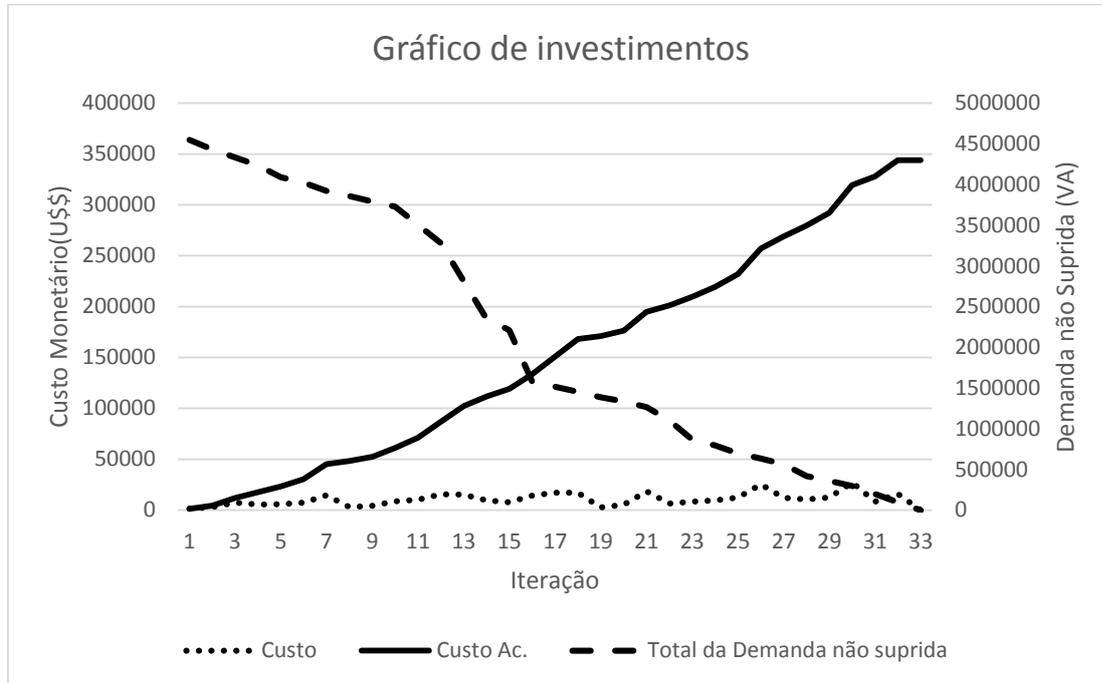


Figura 5.8 Gráfico de investimentos

### 5.5.2 IS com perdas

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos pelo AHC especializado, para solucionar o problema do Sistema de 32 barras, com o indicador de sensibilidade estabelecido por (4.3) e (4.4).

Da mesma forma com o ocorrido com o outro sistema teste, com a troca do IS, utilizando agora aquele que além de considerar o valor da tensão no barramento de conexão e o custo do circuito, considera também as perdas elétricas obtidas com a simulação da entrada do respectivo circuito candidato, observou-se uma pequena diferença na configuração final obtida para o sistema.

Comparando-se as configurações finais, a única diferença foi a troca do circuito 23-24 pelo circuito 26-27. Essa diferença pode ser vista na Figura 5.9 Configuração Final do Sistema, comparando-se com o contido na Figura 5.7 Configuração Final IS sem perdas.

O tempo computacional gasto foi de 69 segundos. Este tempo maior já era esperado pelos mesmos motivos argumentados para o outro sistema teste.

Com esta nova configuração final para a rede, observou-se um ligeiro aumento de custo para construção dos circuitos. Para esta configuração o custo foi para US\$ 347550,00.

As perdas elétricas para esta configuração do sistema foram maiores do que a configuração estabelecida pelo IS anterior. As perdas elétricas calculadas para esta configuração foram de 31,1 kW, enquanto as perdas elétricas calculadas para a configuração obtida pelo outro IS foram de 22,5 kW.

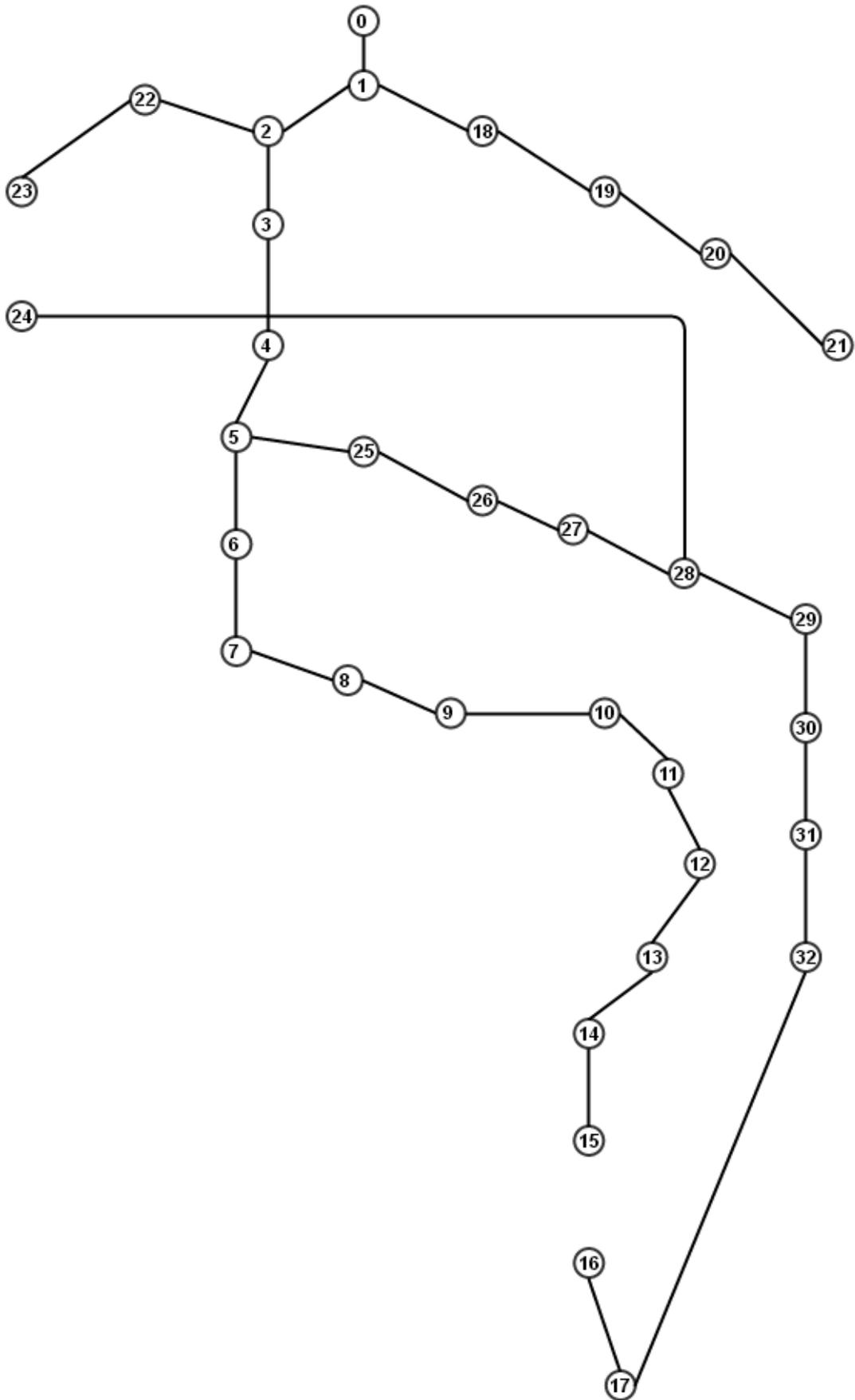


Figura 5.9 Configuração Final do Sistema

A Tabela 5.10 representa o conjunto dos circuitos identificados como interessantes e o escolhido, para cada iteração. A ordem de construção de circuitos varia um pouco com relação ao apresentado pela Tabela 5.6, pois, como já mencionado anteriormente, o indicador de sensibilidade é diferente e por esse motivo a tomada de decisão do algoritmo não necessariamente será a mesma.

Tabela 5.10 Resultado Processo Iterativo

Iter	IE (Linhas Candidatas)	Linha. Esc.	Ação	Custo US\$
1	<b>IE<sub>01-01</sub> = 0,140</b>	(00-01)	Construção	1396,0
2	IE <sub>01-02</sub> =265310400,0 <b>IE<sub>01-18</sub> = 941084900,0</b>	(01-18)	Construção	3058,0
3	<b>IE<sub>01-02</sub> = 151857300,0</b> IE <sub>18-19</sub> = 19067650,0	(01-02)	Construção	7464,0
4	IE <sub>02-03</sub> = 55881310,0 <b>IE<sub>02-22</sub> = 56358820,0</b> IE <sub>18-19</sub> = 14330830,0	(02-22)	Construção	7372,0
5	<b>IE<sub>02-03</sub> = 31505610,0</b> IE <sub>18-19</sub> = 8751103,563 IE <sub>22-23</sub> = 1730386,734	(02-03)	Construção	5541,0
6	<b>IE<sub>03-04</sub> = 21338040,0</b> IE <sub>018-19</sub> = 4785263,814 IE <sub>22-23</sub> = 1434888,810	(03-04)	Construção	5770,0
7	<b>IE<sub>04-05</sub> = 6112878,63</b> IE <sub>018-19</sub> = 3620669,603 IE <sub>22-23</sub> = 1306539,145	(04-05)	Construção	14596,00
8	IE <sub>05-06</sub> = 3587259,433 IE <sub>18-19</sub> = 2761030,236 <b>IE<sub>05-25</sub> = 20997820,0</b> IE <sub>22-23</sub> = 1186630,0	(05-25)	Construção	3073,0
9	IE <sub>05-06</sub> = 2867496,016 IE <sub>18-19</sub> = 2078794,969 IE <sub>22-23</sub> = 1064447,585 <b>IE<sub>25-26</sub> = 11050820,0</b>	(25-26)	Construção	4302,0
10	<b>IE<sub>05-06</sub> = 2327736,414</b> IE <sub>18-19</sub> = 1577445,463 IE <sub>22-23</sub> = 947478,517 IE <sub>26-27</sub> = 1877309,398	(05-06)	Construção	8722,0
11	<b>IE<sub>06-07</sub> = 1036551,029</b> IE <sub>18-19</sub> = 709251,812 IE <sub>22-23</sub> = 626612,473 IE <sub>26-27</sub> = 877586,984	(06-07)	Construção	10108,0
12	<b>IE<sub>07-08</sub> = 520081,361</b> IE <sub>18-19</sub> = 373868,343 IE <sub>22-23</sub> = 414436,493 IE <sub>26-27</sub> = 478872,382 IE <sub>07-20</sub> = 212257,379	(07-08)	Construção	17110,0
13	IE <sub>07-20</sub> = 183436,101 <b>IE<sub>08-09</sub> = 439952,900</b> IE <sub>18-19</sub> = 318747,324 IE <sub>08-14</sub> = 199801,678 IE <sub>22-23</sub> = 369916,126 IE <sub>26-27</sub> = 411531,745	(08-09)	Construção	17263,0
14	IE <sub>07-20</sub> = 159197,455 IE <sub>08-14</sub> = 171885,562 <b>IE<sub>09-10</sub> = 2382550,758</b> IE <sub>18-19</sub> = 272945,354 IE <sub>22-23</sub> = 330045,607 IE <sub>26-27</sub> = 355064,635	(09-10)	Construção	2793,0
15	IE <sub>07-20</sub> = 141414,476 IE <sub>08-14</sub> = 151672,755 <b>IE<sub>10-11</sub> = 1061036,395</b> IE <sub>18-19</sub> = 239753,345 IE <sub>22-23</sub> = 299274,308 IE <sub>26-27</sub> = 313797,504	(10-11)	Construção	5320,0
16	IE <sub>07-20</sub> = 121953,971 IE <sub>08-14</sub> = 121953,414 IE <sub>11-12</sub> = 190839,242 IE <sub>11-21</sub> = 117752,484 IE <sub>18-19</sub> = 203939,377 IE <sub>22-23</sub> = 264034,366 <b>IE<sub>26-27</sub> = 268875,114</b>	(26-27)	Construção	19047,0
17	IE <sub>07-20</sub> = 111613,025 IE <sub>08-14</sub> = 118432,206 IE <sub>11-12</sub> = 174517,413 IE <sub>11-21</sub> = 108076,699 IE <sub>18-19</sub> = 185080,697 IE <sub>22-23</sub> = 243971,647 <b>IE<sub>26-27</sub> = 286121,507</b>	(27-28)	Construção	14389,0

18	IE <sub>07-20</sub> = 91653,822 IE <sub>08-14</sub> = 96717,922 IE <sub>11-12</sub> = 142997,774 IE <sub>11-21</sub> = 89243,729 IE <sub>18-19</sub> = 149220,295 IE <sub>22-23</sub> = 204218,352 <b>IE<sub>24-28</sub>= 214287,652</b> IE <sub>28-29</sub> = 213846,202	(24-28)	Construção	9539,0
19	IE <sub>07-20</sub> = 48207,259 IE <sub>08-14</sub> = 49995,675 IE <sub>11-12</sub> = 74611,547 IE <sub>11-21</sub> = 47515,440 IE <sub>18-19</sub> = 74647,510 IE <sub>22-23</sub> = 112395,761 IE <sub>23-24</sub> = 73534,601 <b>IE<sub>28-29</sub>= 127408,207</b>	(28-29)	Construção	7683,0
20	IE <sub>07-20</sub> = 24037,879 IE <sub>08-14</sub> = 24613,732 IE <sub>11-12</sub> = 36948,130 IE <sub>11-21</sub> = 23855,816 IE <sub>18-19</sub> = 35958,702 <b>IE<sub>22-23</sub>= 57654,198</b> IE <sub>23-24</sub> = 41067,790 IE <sub>29-30</sub> = 44916,708	(22-23)	Construção	15436,0
21	IE <sub>07-20</sub> = 21800,621 IE <sub>08-14</sub> = 22294,738 IE <sub>11-12</sub> = 33485,686 IE <sub>11-21</sub> = 21649,282 IE <sub>18-19</sub> = 32495,160 <b>IE<sub>29-30</sub>= 41023,123</b>	(29-30)	Construção	18482,0
22	IE <sub>07-20</sub> = 18810,454 IE <sub>08-14</sub> = 19199,382 IE <sub>18-19</sub> = 27899,748 <b>IE<sub>30-31</sub>= 95920,229</b> IE <sub>11-12</sub> = 28859,811 IE <sub>11-21</sub> = 18695,794	(30-31)	Construção	6433,0
23	IE <sub>07-20</sub> = 15432,289 IE <sub>08-14</sub> = 15713,943 IE <sub>18-19</sub> = 22753,604 <b>IE<sub>31-32</sub>= 68230,486</b> IE <sub>11-12</sub> = 23643,053 IE <sub>11-21</sub> = 15353,009	(31-32)	Construção	8504,0
24	IE <sub>07-20</sub> = 14544,974 IE <sub>08-14</sub> = 14800,636 IE <sub>18-19</sub> = 21410,395 <b>IE<sub>17-32</sub>= 56009,652</b> IE <sub>11-12</sub> = 22274,636 IE <sub>11-21</sub> = 14473,918	(17-32)	Construção	9539,0
25	IE <sub>07-20</sub> = 13432,908 IE <sub>08-14</sub> = 13657,330 IE <sub>18-19</sub> = 19732,077 <b>IE<sub>16-17</sub>= 40406,723</b> IE <sub>11-12</sub> = 20560,742 IE <sub>11-21</sub> = 13371,531	(16-17)	Construção	12549,0
26	IE <sub>07-20</sub> = 12772,972 IE <sub>08-14</sub> = 12979,573 IE <sub>18-19</sub> = 18738,835 IE <sub>15-16</sub> = 16594,841 <b>IE<sub>11-12</sub>= 19544,277</b> IE <sub>11-21</sub> = 12717,007	(11-12)	Construção	25199,0
27	IE <sub>07-20</sub> = 12347,069 IE <sub>08-14</sub> = 12542,137 IE <sub>18-19</sub> = 18115,608 IE <sub>15-16</sub> = 26058,117 <b>IE<sub>12-13</sub>= 37837,779</b> IE <sub>11-21</sub> = 12279,898	(12-13)	Construção	12078,0
28	IE <sub>07-20</sub> = 11472,220 IE <sub>08-14</sub> = 11644,037 IE <sub>18-19</sub> = 16830,872 IE <sub>15-16</sub> = 14949,988 <b>IE<sub>13-14</sub>= 41433,084</b> IE <sub>11-21</sub> = 11387,119	(13-14)	Construção	10673,0
29	IE <sub>07-20</sub> = 11109,241 IE <sub>18-19</sub> = 16296,372 IE <sub>15-16</sub> = 14488,151 <b>IE<sub>14-15</sub>= 34251,476</b> IE <sub>11-21</sub> = 11018,523	(14-15)	Construção	12467,0
30	IE <sub>07-20</sub> = 10735,957 <b>IE<sub>18-19</sub>= 15745,942</b> IE <sub>11-21</sub> = 10640,502	(18-19)	Construção	27315,0
31	IE <sub>07-20</sub> = 10710,369 <b>IE<sub>19-20</sub>= 50433,958</b> IE <sub>11-21</sub> = 10615,326	(19-20)	Construção	8495,0
32	<b>IE<sub>20-21</sub>= 26915,634</b> IE <sub>11-21</sub> = 10579,151	(20-21)	Construção	15834,0

Até a iteração de número 19, o IS do AHC especializado consegue manter as perdas totais do sistema menor quando comparado iterativamente com as tomadas de decisões estabelecidas pelo outro IS. Depois dessa iteração, e como consequência das poucas opções de circuitos candidatos, e ainda considerando que a distribuição de cargas não é uniforme, a

configuração final obtida acaba não tendo as perdas elétricas reduzidas, como aconteceu nos testes com o outro sistema.

Para ilustrar a quantidade de recursos (custo, custo acumulado e a quantidade da demanda atendida), durante a dinâmica de conexão dos barramentos no processo iterativo, é apresentado o gráfico da Figura 5.10

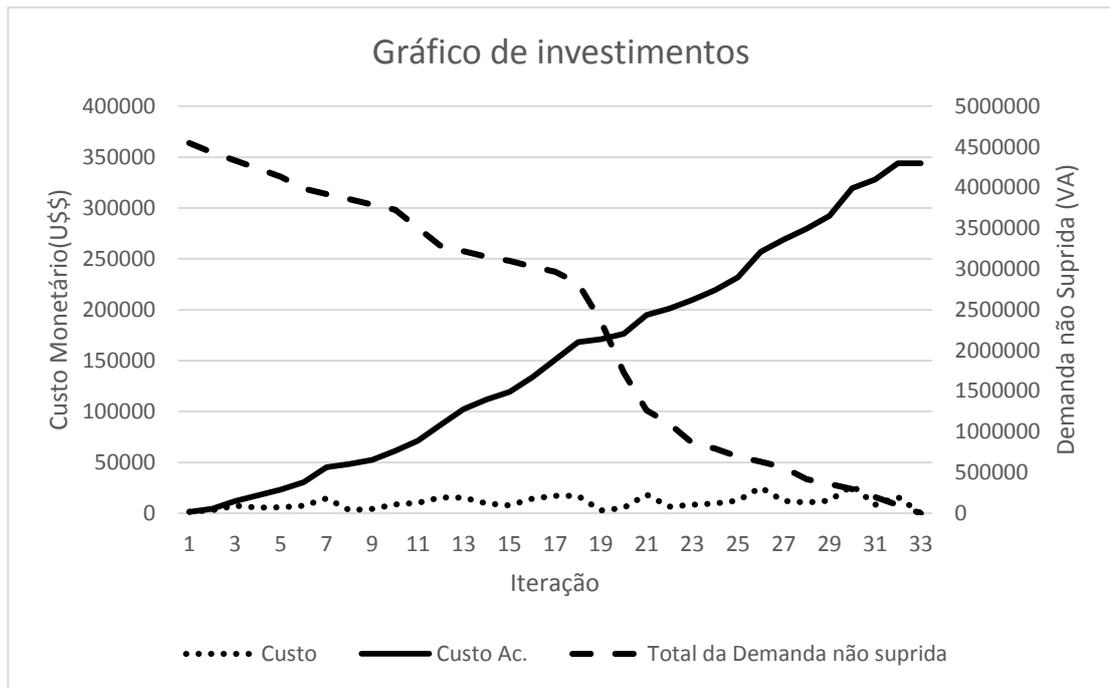


Figura 5.10 Gráfico Investimentos

## 5.6 Considerações Finais do Capítulo

A proposta deste capítulo foi apresentar os testes e os resultados obtidos através da simulação do AHC especializado.

Foram apresentados dois sistemas testes, com características diferentes, para avaliar o desempenho do algoritmo.

Os sistemas testes empregados foram: o Sistema de 23 barras e uma adaptação do Sistema de 32 barras, ambos conhecidos da literatura especializada.

O Sistema de 23 barras tem, por características, mais opções de circuitos candidatos por barramentos, quando comparado com o outro sistema. O Sistema de 32 barras, por sua vez,

possui uma distribuição de demandas (cargas) não tão uniforme quanto a distribuição do outro sistema.

Para os dois sistemas testes o AHC especializado teve um bom desempenho, convergindo e obtendo uma configuração factível e de boa qualidade.

Levando em consideração o desempenho do AHC especializado para cada sistema teste individualmente, pode-se concluir que para resolver o Sistema de 23 barras o desempenho foi ligeiramente superior, pelos resultados obtidos com a utilização dos dois IS.

# Capítulo 6

## Conclusões

Este trabalho apresentou um novo algoritmo especializado para ser aplicado no problema do planejamento da expansão de redes aéreas de sistemas de distribuição.

Como técnica de solução foi empregado um Algoritmo Heurístico Construtivo, com a possibilidade de utilizar dois tipos de indicadores de sensibilidade, ambos baseados nas informações dos dados do sistema (custo dos circuitos) e nas informações fornecidas por uma subrotina com capacidade de resolver o fluxo de potência CA através de um método de varredura (BFS). O desempenho computacional verificado foi melhor do que a do algoritmo apresentado em (ROCHA et al 2012).

O AHC especializado foi testado em dois sistemas testes com características diferentes.

Em um contexto geral, para os dois sistemas testes, pode-se concluir que algoritmo teve um bom desempenho, convergindo e obtendo configurações factíveis para os sistemas com excelentes tempos de processamento.

Comparando-se os resultados obtidos para o sistemas, e levando em consideração as características de cada sistema, o AHC especializado teve um desempenho ligeiramente superior na busca pela solução do Sistema de 23 barras, com o IS estabelecido por (4.1) e (4.2) estabelecendo a configuração para o sistema com o menor custo de construção de circuitos, e com o IS estabelecido por (4.3) e (4.4) estabelecendo uma configuração para o sistema com menores perdas elétricas, sendo esta última configuração idêntica àquelas obtidas por outros algoritmos descritos na literatura que representaram o sistema através de modelos matemáticos com as funções objetivos procurando minimizar o custo de investimento e o custo de operação (perdas elétricas).

Já para o Sistema de 32 barras, o IS estabelecido por (4.1) e (4.2) estabeleceu a configuração para o sistema com o menor custo de construção de circuitos, porém, a configuração obtida para o sistema com o IS estabelecido por (4.3) e (4.4) não foi a com

menores perdas elétricas. A explicação para isto está relacionada com as características deste sistema, com poucas opções de circuitos candidatos à adição por barramento e também com a forma de distribuição das demandas.

Existem maneiras de melhorar o desempenho do algoritmo para estes casos. Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se implementar uma fase de melhoria local buscando-se construir um novo circuito “desconstruindo-se” outra linha à jusante ou à montante, tomando o devido cuidado para evitar o fechamento de laços no sistema.

Outra forma de contornar o problema é propor outros indicadores de sensibilidade. Neste contexto e considerando ainda a utilização da subrotina para o cálculo do fluxo de potência CA, uma sugestão seria propor um IS para considerar não só uma tomada de decisão (a melhor para a iteração corrente) mas outras também, formando uma estrutura decisória do tipo *Branch and Bound*, tendo por resultado não apenas uma configuração para o sistema, mas várias, podendo ser escolhida aquela mais interessante para a solução do sistema.

Uma outra sugestão para trabalhos futuros, mas para tornar o algoritmo mais genérico do ponto de vista de aplicação, é a de torna-lo aplicável a sistemas com múltiplas subestações para a solução não apenas do problema de expansão, mas também de reconfiguração de circuitos.

# Referências Bibliográficas

- Bastos, M. R. (2008). Retratos Do Poder Imperial No Brasil. Revista FAAP FACOM n° 19: 42-51.
- Brooke, A., Kendrick, D. A. and Meeraus A. (1997). GAMS: Sistema Geral de Modelagem Algébrica, São Paulo.
- Camargo, V., Lavorato, M. and Romero, R. (2013). Specialized Genetic Algorithm to Solve the Electrical Distribution System Expansion Planning. In 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2:1–5. IEEE.
- Casazza, J. and Delea, F. (2003). Understanding Electric Power Systems: An Overview of the Technology and the Marketplace.
- Cheng, C.S., and Shirmohammadi, D. (1995). A Three-Phase Power Flow Method for Real-Time Distribution System Analysis. IEEE Transactions on Power Systems 10 (2) : 671–679.
- Ciric, R. M., Feltrin, A. P. and Ochoa, L. F. (2003). Power Flow in Four-Wire Distribution Networks-General Approach. IEEE Transactions on Power Systems 18 (4) : 1283–1290.
- Garver, L. (1970). Transmission Network Estimation Using Linear Programming. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-89 (7) : 1688–1697.
- Gomez, J. F., Khodr, H. M., Oliveira, P. M., Ocque, L., Yusta, J.M., Villasana, R. and Urdaneta, A. J. (2004). Ant Colony System Algorithm for the Planning of Primary Distribution Circuits. IEEE Transactions on Power Systems 19 (2): 996–1004.
- Goswami, S. K. and Basu, S. K. (1992). A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization. IEEE Transactions on Power Delivery 7 (3) : 1484–1491.
- Hashimoto, S. H. M. (2005). Análise E Desenvolvimento de Algoritmos Eficientes de Programação Linear Para O Problema de Planejamento de Sistemas de Transmissão a Longo Prazo, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Ilha Solteira.
- Henderson, M. I. (2014). When the Lights Go Out: Getting Power Systems Running Again [Guest Editorial]. IEEE Power and Energy Magazine 12 (1) : 18–23.
- Khator, S. K., and Leung, L. C. (1997). Power Distribution Planning: A Review of Models and Issues. IEEE Transactions on Power Systems 12 (3): 1151–1159.
- Knight, U. G. W. (1960). The Logical Design of Electrical Networks Using Linear Programming Methods. Proceedings of the IEE Part A: Power Engineering 107 (33): 306.
- Kocar, I. and Lacroix, J. S. (2012). Implementation of a Modified Augmented Nodal Analysis Based Transformer Model into the Backward Forward Sweep Solver. In 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 1–1. IEEE.

- Lavorato, M. (2010). Planejamento Integrado Da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Comissão Examinadora: Campinas: Universidade Estadual de Campinas Faculdade, Campinas.
- Lavorato, M., Rider, M. J., Garcia, A. V. and Romero, R. (2010). A Constructive Heuristic Algorithm for Distribution System Planning. *IEEE Transactions on Power Systems* 25 (3): 1734–1742.
- Levi, V. A. and Calovic, M. S. (1991). A New Decomposition Based Method for Optimal Expansion Planning of Large Transmission Networks. *IEEE Transactions on Power Systems* 6 (3): 937–943.
- Levy, L. F. (eds) (2003). *O Novo Brasil*. Editora Nobel, São Paulo.
- Marcolin, N. (2005). Rotas Da Eletricidade. Pesquisa FAPESP 118. Acesso em: maio/14.  
Disponível em: <http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2005/12/08-09-memoria.pdf>
- Miguez, E., Cidras, J., Diaz-Dorado, E. and Garcia-Dornelas, J. L. (2002). An Improved Branch-Exchange Algorithm for Large-Scale Distribution Network Planning. *IEEE Transactions on Power Systems* 17 (4) : 931–936.
- Monticelli, A., Santos, A., Pereira, M. F., Cunha, S., Parker, B. and Praca, J. G. (1982). Interactive Transmission Network Planning Using a Least-Effort Criterion. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-101* (10) : 3919–3925.
- Monticelli, A. J. (1983). Fluxo de Carga Em Redes de Energia Elétrica, São Paulo.
- Moreira, L. (2014). Ribeirão Do Inferno: A Primeira Hidrelétrica Do Brasil. Acesso em: maio/14.  
Disponível em: <http://www.revistaempreiteiro.com.br/Publicacoes/11247/Inscricao.aspx>
- Nahman, J. M. and Peric, D. M. (2008). Optimal Planning of Radial Distribution Networks by Simulated Annealing Technique. *IEEE Transactions on Power Systems* 23 (2) : 790–795.
- Najafi, S., Hosseinian, S. H., Abedi, M., Vahidnia, A. and Abachezadeh, S. (2009). A Framework for Optimal Planning in Large Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Systems* 24 (2) : 1019–1028.
- NR10 - Segurança Em Instalações E Serviços Em Eletricidade. (2004). Acesso em: abril/14.  
Disponível em: [http://portal.mte.gov.br/data/files/8A7C812D308E216601310641F67629F4/nr\\_10.pdf](http://portal.mte.gov.br/data/files/8A7C812D308E216601310641F67629F4/nr_10.pdf)
- Paiva, P. C., Khodr, H. M., Yusta, J. M. and Urdaneta, A. J. (2005). Integral Planning of Primary – Secondary Distribution Systems Using Mixed Integer Linear Programming 20 (2): 1134–1143.
- Pantuzi, A. V. (2006) Desempenho de um algoritmo backward-forward sweep de cálculo de fluxo de potência, Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica., Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira.
- Pereira, M., and Leontina P. (1985). Application Of Sensitivity Analysis Of Load Supplying Capability To Interactive Transmission Expansion Planning. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-104* (2) : 381–389.

- Ponnaivaikko, N., Prakasa Rao K. S. and Venkata S. S. (1987). Distribution System Planning through a Quadratic Mixed Integer Programming Approach. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2 (4): 1157–1163.
- Ramírez-rosado, I. J. and Domínguez-navarro, J. A. (2006). New Multiobjective Tabu Search Algorithm for Fuzzy Optimal Planning of Power Distribution Systems 21 (1): 224–233.
- Rich, E. and Knight, K.. (1993). *Inteligência Artificial*. Editora Blucher, São Paulo.
- Rocha, C, Contreras, J., Lotero, R .C. and Muñoz, J.I. (2012). “Um Modelo Híbrido Linear Aplicado Ao Planejamento Da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.” *Swge.inf.br*: 1–6.
- Rocha, C, J Contreras, R Lotero, and J Muñoz. (2012). Algoritmo Heurístico Construtivo Enumerativo Aplicado Ao Planejamento Da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. *Eletrica.ufpr.br*: 2156–2163.
- Romero, R, and C Rocha. (2005). Constructive Heuristic Algorithm for the DC Model in Network Transmission Expansion Planning. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution* 152: 277–282.
- Romero, R, C Rocha, M. Mantovani, and J.R.S. Mantovani. (2003). Analysis of Heuristic Algorithms for the Transportation Model in Static and Multistage Planning in Network Expansion Systems. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution* 150 (5): 521.
- Rustelbakke, H. M. (eds) (1983). *Electric Utility Systems and Practices*, Editora Wiley, New York.
- Sampaio, M.E.C. (2014). O Que É Planejamento?. Acesso em: janeiro/14 Disponível em: <http://www.administradores.com.br/artigos/administracao-e-negocios/o-que-e-planejamento/39381/>.
- Shirmohammadi, D., Hong, H. W., Semlyen, A. and Luo, G. X. (1988). A Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks. *IEEE Transactions on Power Systems* 3 (2) : 753–762.
- Siemens, W. V. (2014). Siemens Corporate Archives. Acesso em: Dezembro/14. Disponível em: [https://www.siemens.com/history/pool/perseunlichkeiten/gruendergeneration/werner\\_v\\_o](https://www.siemens.com/history/pool/perseunlichkeiten/gruendergeneration/werner_v_o).
- Silva, L. L. F. (2006). *Iluminação Pública no Brasil: Aspectos Energéticos e Institucionais*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro- COPPE, Rio de Janeiro.
- Sousa, A. S. and Asada, E. N (2009). Fuzzy Guided Constructive Heuristic Applied to Transmission System Expansion Planning. In 2009 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, 1–6. IEEE.
- Tomoiaga, B., Chindris M., Sudria-Andreu A. and Sumper A. (2011). Object Oriented Backward/forward Algorithm for Unbalanced and Harmonic Polluted Distribution Systems. In 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 1–6. IEEE.

- Vaziri, M., Tomsovic K. and Bose A. (2004). A Directed Graph Formulation of the Multistage Distribution Expansion Problem. *IEEE Transactions on Power Delivery* 19 (3) : 1335–1341.
- Vaziri, M., Tomsovic, K. and Gönen, T. (2000). Distribution Expansion Problem Revisited. part 2 proposed modeling and formulation, (3). Disponível em: <http://web.eecs.utk.edu/~tomsovic/Vitae/Publications/VAZI00b.pdf>
- Villasana, R., Garver, L. and Salon, S. (1985). Transmission Network Planning Using Linear Programming. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-104* (2) : 349–356.
- Wang, J., Lin Lu, Jun-Yong Liu, and Sheng Zhong. (2010). Reconfiguration of Distribution Network with Dispersed Generators Based on Improved Forward-Backward Sweep Method. In *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 1–5. IEEE.
- Willis, H.L. 2004. *Power Distribution Reference Book*. Mark Dekke, New York.
- Yao, Y., Wu Z., Wang D. and Zhang F. (2009). The Effect of Transformer Representation on the Convergence of the Backward Forward Sweep Method for Distribution Power Network. In *2009 International Conference on Industrial and Information Systems*, 399–402. IEEE.
- Zeinaddini-Maymand, M., Rashidinejad, M., Mohammadian, M., Mahmoudabadi, A., Khorasani, H. and Rahmani, M. (2011). An Application of a Modified Constructive Heuristic Algorithm to Transmission Expansion Planning. *2011 IEEE Trondheim PowerTech*: 1–5.