



Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em  
**Computação Aplicada**  
Mestrado Acadêmico

Eduardo Augusto Martins

UM SISTEMA COMPUTACIONAL PARA APOIO A PROJETOS  
DE REDES DE COMUNICAÇÃO EM SISTEMAS  
CENTRALIZADOS DE MEDIÇÃO DE CONSUMO E  
TARIFAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA  
Desenvolvimento e Implementação Através de uma  
Abordagem Metaheurística

São Leopoldo, 2013



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS — UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA  
NÍVEL MESTRADO

EDUARDO AUGUSTO MARTINS

UM SISTEMA COMPUTACIONAL PARA APOIO A PROJETOS DE REDES DE  
COMUNICAÇÃO EM SISTEMAS CENTRALIZADOS DE MEDIÇÃO DE CONSUMO E  
TARIFAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA  
Desenvolvimento e Implementação Através de uma Abordagem Metaheurística

SÃO LEOPOLDO  
2013



Eduardo Augusto Martins

UM SISTEMA COMPUTACIONAL PARA APOIO A PROJETOS DE REDES DE  
COMUNICAÇÃO EM SISTEMAS CENTRALIZADOS DE MEDIÇÃO DE CONSUMO E  
TARIFAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA  
Desenvolvimento e Implementação Através de uma Abordagem Metaheurística

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para a obtenção do título de Mestre pelo  
Programa de Pós-Graduação em Computação  
Aplicada da Universidade do Vale do Rio dos  
Sinos — UNISINOS

Orientador:  
Prof. Dr. José Vicente Canto dos Santos

São Leopoldo  
2013

M386s

Martins, Eduardo Augusto.

Um sistema computacional para apoio a projetos de redes de comunicação em sistemas centralizados de medição de consumo e tarifação de energia elétrica : desenvolvimento e implementação através de uma abordagem metaheurística / Eduardo Augusto Martins. – 2013.  
109 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-graduação em Computação Aplicada, 2013.  
"Orientador: Prof. Dr. José Vicente Canto dos Santos."

1. Infraestrutura avançada de medição. 2. Sistemas de medição centralizados. 3. Simulated annealing. 4. Problema do recobrimento. 5. Redes inteligentes. 6. Otimização. I. Título.

CDU 004

*“Com o tempo você perceberá que possuir ‘isto’ não será tão prazeroso como desejar... e nem muito lógico”.*  
(Oficial da Frota Estelar e Embaixador da Federação, Spock)



Este trabalho é dedicado às pessoas que me tornam sempre mais forte: Leizi, Rafa e Nati.  
Também dedico a meus pais, que muito se orgulham da minha trajetória e dedicação.  
Meu irmão, que segue segue os passos certos, por seu próprio caminho.  
Meu primo, Diogo, maior incentivador e exemplo de carreira acadêmica.  
Parabéns a vocês!



## **AGRADECIMENTOS**

Dedicação, paciência, incentivo e apoio. Estas palavras podem ser resumidas em apenas uma: Leizi. Obrigado por permanecer comigo neste período da nossa vida, que mesmo sendo o mais trabalhoso, nos fortaleceu e nos uniu ainda mais!

Meu orientador e amigo, Professor Dr. José Vicente, que me acolheu, me incentivou e ajudou a tornar este dia possível.

Meus professores de mestrado, em especial, Professor Dr. Leonardo e Professor Dr. Arthur. Professores fantásticos e exemplos que seguirei como objetivo de carreira acadêmica.

Meu primo, Diogo, que sempre me ajudou com algum conselho quando eu precisava ouvir um bom conselho.

Pai e mãe: tudo começou com vocês...



## RESUMO

Sistemas centralizados de medição de energia são atualmente uma escolha para automatizar redes e garantir o funcionamento do complexo sistema de distribuidoras de energia elétrica. Atualmente, estes sistemas compõem as chamadas *smart grids*, redes inteligentes de geração, transmissão e distribuição de energia, dotadas de dispositivos de comunicação de dados, possibilitando a aplicação de sistemas distribuídos, com base na troca de informações entre equipamentos, formando uma nova rede, também de alta complexidade, para interligação e controle de dados. No Brasil, um trabalho inédito vem sendo desenvolvido na criação deste tipo de rede: a utilização de uma infraestrutura avançada de medição, baseada em sistemas de medição centralizada, alocadas em áreas de grandes concentrações urbanas, com objetivos de diminuição, ou até mesmo eliminação de perdas comerciais de distribuição de energia, emerge como novidade na aplicação de redes inteligentes de distribuição de energia elétrica no país. Este trabalho tem por objetivo a descrição do desenvolvimento de uma solução computacional, baseada em um método de busca metaheurística conhecido como *Simulated Annealing* para apoio à formulação de projetos de redes otimizadas de infraestrutura avançada de medição que utilizam equipamentos de sistemas de medição centralizados em uma rede de distribuição de energia elétrica, garantindo máxima cobertura da rede, atendimento a todos os clientes geograficamente localizados na região de projeto, minimizando custos de instalação dos sistemas. Na busca deste objetivo, este trabalho apresenta a redução do problema de otimização para o Problema do Recobrimento, a construção do modelo matemático, a implementação computacional e as aplicações na forma de simulações e resultados. A metodologia proposta, aplicada ao sistema computacional como forma de simulação, permite uma análise muito rápida e dinâmica de topologias de rede a serem projetadas para utilização em projetos de redes de comunicações, onde se utilizam sistemas de medição centralizados. O sistema computacional permite a alteração das características de simulação e das características das redes, dependendo das restrições impostas pela área geográfica em estudo. A estratégia apresenta bons resultados na formação de topologias de redes de comunicação para sistemas de medição centralizada, bem como otimização na utilização de equipamentos, reduzindo custos de instalação na rede.

**Palavras-chave:** Infraestrutura Avançada de Medição. Sistemas de Medição Centralizados. *Simulated Annealing*. Problema do Recobrimento. Redes inteligentes. Otimização.



## ABSTRACT

Centralized systems of energy measurement are actually a choice for automating networks and ensure the operation of the complex system of electricity distribution. Currently, these systems comprise the so-called smart grid generation, transmission and distribution of energy, equipped with data communication devices, enabling the implementation of distributed systems, based on the exchange of information between devices, forming a new network, of high complexity, and for interconnection data control. In Brazil, a new work is being developed for creating this type of network: the use of an advanced infrastructure for measurement, centralized measurement systems allocation in areas of large urban concentrations, with goals of reducing, or even eliminating, commercial losses of power distribution, that emerges as a novelty in applying smart grid distribution of electricity in the country. This work aims at describing the development of a computational solution, based on a metaheuristic search method known as Simulated Annealing to support the design of optimized network for advanced metering infrastructure using equipment measurement systems on a centralized network of power distribution, ensuring maximum coverage, service to all customers geographically located in the area and minimizing installation costs of the systems. In pursuit of this goal, the work presents the reduction of the optimization problem to the covering problem, the mathematical model construction, computational implementation and application in the form of simulations and results. The methodology applied to the computing system like a simulation, allows an very fast and dynamic analysis of the network topologies to be designed for use in projects where communication networks are used in centralized measurement systems. The computing system allows modification of simulation features and characteristics of networks, depending on the constraints imposed by the geographical area under consideration. The strategy presents good results in the formation of network topologies communication systems for centralized measurement and optimizing the use of equipment, reducing installation costs in the network.

**Keywords:** Advanced Meter Infrastructure. Centralised Measurement Systems. Simulated Annealing. Covering Problem. Smart grids. Optimization.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Exemplo de uma rede complexa de um sistema elétrico convencional. . . . .	28
Figura 2:	Diagrama simplificado de um sistema elétrico convencional. . . . .	29
Figura 3:	Medidor registrador eletromecânico de consumo de energia elétrica. . . . .	29
Figura 4:	Modelo conceitual de uma rede elétrica inteligente. . . . .	30
Figura 5:	Exemplo de conectividade de uma rede <i>Mesh</i> . . . . .	32
Figura 6:	Exemplo de reconfiguração de rede. . . . .	33
Figura 7:	Arquitetura da rede GSM. . . . .	33
Figura 8:	Arquitetura da rede GPRS. . . . .	34
Figura 9:	Composição, estrutura e diagrama de fluxo de dados de uma rede AMI. . . . .	35
Figura 10:	Divisão em camadas de um sistema AMI. . . . .	36
Figura 11:	Elementos da plataforma de comunicações de uma rede inteligente — última milha. . . . .	37
Figura 12:	Exemplo de aplicação para controle de demanda e registro de consumo (camada de aplicação). . . . .	38
Figura 13:	Comunicação remota entre a Central de Operações e algum nó objetivo, passando pelo nó concentrador (equipamento mestre da rede). . . . .	38
Figura 14:	Processo de instalação de um sistema de medição centralizado. . . . .	39
Figura 15:	Comunicação entre sistemas centralizados de medição e aplicações, formando uma rede local. . . . .	39
Figura 16:	Determinação da área geográfica para a instalação dos recursos de medição centralizada. . . . .	40
Figura 17:	Determinação da área geográfica para a instalação dos recursos de medição centralizada. . . . .	41
Figura 18:	Vista parcial de uma planta executiva. . . . .	42
Figura 19:	Vista de uma planta executiva de alta densidade. . . . .	43
Figura 20:	Arquitetura da solução AMI. . . . .	44
Figura 21:	Exemplo de um grafo. . . . .	45
Figura 22:	Uma rede de comunicações e suas ligações. . . . .	47
Figura 23:	Uma rede de comunicações e suas ligações representada por teoria de grafos para a formação da matriz de adjacências. . . . .	47
Figura 24:	Trajetória típica de um algoritmo de busca <i>simulated annealing</i> . . . . .	50
Figura 25:	Arquitetura proposta da ferramenta computacional. . . . .	65
Figura 26:	Representação gráfica dos estados de um autômato. . . . .	66
Figura 27:	Autômato representando o cerne da ferramenta proposta. . . . .	66
Figura 28:	Autômato representando a aplicação da solução inicial factível. . . . .	68
Figura 29:	Autômato representando a aplicação da melhoria inicial. . . . .	70
Figura 30:	Autômato representando a geração de soluções da busca em vizinhança da estratégia 1. . . . .	71
Figura 31:	Autômato representando a geração de soluções da busca em vizinhança da estratégia 2. . . . .	73
Figura 32:	Autômato representando a geração de soluções da busca em vizinhança da estratégia 3. . . . .	75
Figura 33:	Autômato representando a geração de soluções da busca em vizinhança da estratégia 4. . . . .	76
Figura 34:	Autômato representando a geração de soluções da busca em vizinhança da estratégia 5. . . . .	78

Figura 35:	Autômato representando o algoritmo de otimização <i>Simulated Annealing</i> . . .	80
Figura 36:	Tela de apresentação da ferramenta de otimização. . . . .	82
Figura 37:	Tela de apresentação da Função Objetivo. . . . .	83
Figura 38:	Aba de configuração de parâmetros. . . . .	83
Figura 39:	Projeto executivo da rede de distribuição de energia elétrica. . . . .	87
Figura 40:	Exemplos de topologias sugeridas para o problema de 11 pontos candidatos e 58 clientes. . . . .	90
Figura 41:	Representação gráfica das convergências médias das simulações para rede de 11 pontos candidatos e 58 clientes. . . . .	91
Figura 42:	Representação gráfica das evoluções individuais de cada simulação do problema. . . . .	91
Figura 43:	Processo de busca da solução (simulação 3). . . . .	93
Figura 44:	Rede real, instalada na região geográfica em estudo. . . . .	94
Figura 45:	Exemplo de uma rede projetada pela ferramenta computacional. . . . .	95
Figura 46:	Projeto de uma rede com 274 clientes e 28 pontos candidatos. . . . .	96
Figura 47:	Representação gráfica das convergências médias das simulações para rede de 28 pontos candidatos e 274 clientes, com taxa de resfriamento 0,9. . . . .	97
Figura 48:	Representação gráfica das convergências médias das simulações para rede de 28 pontos candidatos e 274 clientes, com taxa de resfriamento 0,95. . . . .	98
Figura 49:	Representação gráfica das convergências médias das simulações para rede de 28 pontos candidatos e 274 clientes, com taxa de resfriamento 0,99. . . . .	99
Figura 50:	Comparação das médias dos resultados encontrados em simulações com diferentes parâmetros de taxa de resfriamento. . . . .	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Arquivo de entrada <b>Pontos SMC</b> . . . . .	87
Tabela 2:	Arquivo de entrada <b>Pontos CLI</b> . . . . .	88
Tabela 3:	Valores ótimos obtidos nas simulações. . . . .	89
Tabela 4:	Resultados médios para simulação de rede com 11 pontos candidatos e 58 clientes. . . . .	89
Tabela 5:	Configuração de uma topologia real de uma rede formada por sistemas de medição centralizada. . . . .	92
Tabela 6:	Exemplo de configuração da topologia projetada pelo sistema de busca metaheurística. . . . .	95
Tabela 7:	Resultados médios para simulação de rede com 28 pontos candidatos e 274 clientes e taxa de resfriamento igual a 0,9. . . . .	96
Tabela 8:	Resultados médios para simulação de rede com 28 pontos candidatos e 274 clientes e taxa de resfriamento igual a 0,95. . . . .	97
Tabela 9:	Resultados médios para simulação de rede com 28 pontos candidatos e 274 clientes e taxa de resfriamento igual a 0,95. . . . .	98
Tabela 10:	Comparação das médias dos resultados encontrados em simulações com diferentes parâmetros de taxa de resfriamento. . . . .	100



## LISTA DE SIGLAS

3G	Terceira geração de padrões e tecnologias de telefonia móvel
AMI	<i>Advanced Meter Infrastructure</i>
BSS	<i>Base Station Subsystem</i>
BT	Baixa Tensão
CLI	Cliente
GGNS	<i>Gateway GPRS Support Node</i>
GPRS	<i>General Packet Radio System</i>
GRAS	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
GSM	<i>Group Special Mobile</i>
HAN	<i>Home Area Network</i>
ISDN	<i>Integrated Service Digital Network</i>
MS	<i>Mobile Station</i>
NSS	<i>Network and Switching Subsystem</i>
OMS	<i>Operations and Maintenance System</i>
PCU	<i>Packet Control Unit</i>
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network</i>
RF	Rádio Frequência
SA	<i>Simulated Annealing</i>
SGSN	<i>Serving GPRS Support Node</i>
SMC	Sistema de Medição Centralizado
VNS	<i>Variable Neighborhood Search</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity (IEEE 802.11)</i>



## LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
<i>km</i>	quilômetro
kW	quiloWatt
kW · h	quiloWatt-hora
h	hora
m	metro
MHz	Mega Hertz
kbps	kilobit por segundo
W	Watt



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
1.1 <b>Motivação</b>	24
1.2 <b>Objetivos e Contribuições</b>	24
1.3 <b>Organização do Documento</b>	25
<b>2 CONCEITOS BÁSICOS</b>	<b>27</b>
<b>2.1 Conceitos Básicos de Distribuição de Energia Elétrica</b>	<b>28</b>
2.1.1 Redes de Distribuição de Energia Elétrica	28
2.1.2 Das Redes de Distribuição Convencionais às Redes Inteligentes de Distribuição	30
2.1.3 Infraestrutura de Comunicações	31
2.1.4 Infraestrutura de Medição	35
<b>2.2 Como Funciona uma Rede AMI</b>	<b>37</b>
2.2.1 Arquitetura da Rede AMI	39
2.2.2 Determinação da Instalação dos Recursos de uma Rede AMI	40
2.2.3 Composição de uma Rede AMI	43
<b>2.3 Representação Gráfica e Numérica de Redes de Telecomunicação</b>	<b>45</b>
2.3.1 Teoria de Grafos	45
2.3.2 Representação de um Grafo por Matriz de Adjacências	46
<b>2.4 O Problema do Recobrimento</b>	<b>47</b>
<b>2.5 Otimização por Metaheurísticas</b>	<b>49</b>
2.5.1 <i>Simulated Annealing</i> (Têmpera Simulada)	50
2.5.2 Estruturas de Vizinhança	52
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>55</b>
<b>3.1 Contribuição dos Trabalhos Correlatos para a Técnica Proposta</b>	<b>59</b>
<b>4 METODOLOGIA</b>	<b>61</b>
<b>4.1 Modelagem Matemática do Problema</b>	<b>61</b>
4.1.1 Função Objetivo	61
4.1.2 Restrições	61
4.1.3 Apresentação da Modelagem Matemática	63
<b>4.2 Estratégia de Otimização</b>	<b>64</b>
4.2.1 Solução Inicial Factível	67
4.2.2 Melhoria Inicial	69
4.2.3 Geração de Vizinhanças: Estratégia 1 – Retira um SMC do sistema e realoca os clientes ao SMC mais próximo	70
4.2.4 Geração de Vizinhanças: Estratégia 2 – Insere um SMC na rede e liga os clientes mais próximos	72
4.2.5 Geração de Vizinhanças: Estratégia 3 – Maximização das taxas de ocupação das caixas de medição	74
4.2.6 Geração de Vizinhanças: Estratégia 4 – Retira o SMC de maior custo	76
4.2.7 Geração de Vizinhanças: Estratégia 5 – Retira SMC com baixa taxa de ocupação	78
<b>4.3 Algoritmo de Otimização <i>Simulated Annealing</i></b>	<b>79</b>
4.3.1 Estratégias de Diversificação	81
<b>4.4 Apresentação da Ferramenta de Otimização</b>	<b>82</b>

<b>5</b>	<b>SIMULAÇÕES E RESULTADOS</b>	<b>85</b>
5.1	Planejamento da Rede	85
5.2	Planejamento de uma Rede 16 Pontos Candidatos e 58 Clientes	86
5.2.1	Avaliação da Rede Instalada <i>Versus</i> Rede Proposta	92
5.3	Planejamento de uma Rede com 28 Pontos Candidatos e 274 Clientes	94
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>101</b>
6.1	Oportunidades para Trabalhos Futuros	103
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>105</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Sistemas centralizados de medição de energia são atualmente uma escolha para automatizar redes e garantir o funcionamento do complexo sistema de distribuidoras de energia elétrica. Atualmente, estes sistemas compõem as chamadas *smart grids*, redes inteligentes de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, alvo de inúmeros estudos nos dias de hoje (GRZEIDAK et al., 2011).

A rede inteligente é formada pelos próprios equipamentos nela instalados, normalmente dotados de algum dispositivo de comunicação de dados, que pode ser desde uma rede proprietária e privada até a rede pública de telecomunicações. Também pode ter variação em sua camada física, utilizando comunicações dotadas de fios ou através da utilização de radiofrequências.

A utilização deste tipo de inteligência tem se tornado frequente em função de diversos aspectos, tais como a implementação de automatismos na rede, melhoria na qualidade de fornecimento e distribuição de energia elétrica, velocidade no atendimento a clientes e ganhos econômicos significativos. Isto é possível graças à instalação de dispositivos eletrônicos complexos, que apresentam características multifuncionais e não apenas suas funções primárias, com a integração de diversos recursos adicionais, como medição, proteção, aquisição de dados e comunicação.

O aumento desta complexidade nas redes de energia vem possibilitando a aplicação de sistemas distribuídos, com base na troca de informações entre equipamentos, formando uma nova rede, também de alta complexidade, para interligação e controle de dados. A manipulação destes dados em tempo real permite às concessionárias uma significativa redução de perdas, sejam elas técnicas ou comerciais, aumento do nível de confiabilidade dos sistemas de distribuição e restabelecimento do sistema no caso de ocorrência de falhas ou perturbações, através de medições e controles em tempo real.

A elaboração de um projeto de sistema de distribuição de energia elétrica (chamado de projeto executivo), que consiste em um produto gráfico do planejamento da instalação dos equipamentos, deve conter todas as informações necessárias para o perfeito entendimento do projeto e execução da obra. Este projeto procura apresentar soluções para possíveis interferências encontradas, compatibilização com outras áreas do conhecimento (arquitetura, estrutura, hidráulica/incêndio, distribuição de gás, entre outras) e demais detalhes construtivos. Um projeto deste porte tem se demonstrado de grande complexidade, pois acrescenta agora um conjunto de novas variáveis a serem consideradas: número de assinantes ligados a cada conjunto de medição, perda de sinal de rádiofrequência (RF) em função de obstáculos e distâncias, impossibilitando a instalação de equipamentos, equipamento já instalados, topologias de redes, entre outras.

## 1.1 Motivação

Em sistemas de distribuição de energia elétrica a variável **faturamento**, derivada de outras diversas variáveis, como medição do consumo, qualidade de energia e perdas comerciais, tem grande visibilidade, principalmente em áreas de grande concentração urbana e ambientes de contexto sócio econômico desfavorável, motivada pelas perdas comerciais geradas por furtos de energia, conforme Hernandez et al. (2011).

A medição de energia em instalações consumidoras é fator determinante para a manutenção da qualidade no sistema de distribuição de energia, tanto do ponto de vista da concessionária quanto do consumidor. Uma geração e distribuição de qualidade tendem a diminuir gastos exagerados e perdas no sistema elétrico.

Um trabalho inédito na criação de redes de infraestrutura avançada de medição vem dominando o mercado de medição da indústria brasileira e das provedoras de energia elétrica: sistemas de medição centralizados, alocados em áreas de grande concentração urbana estão se tornando uma saída inteligente objetivando diminuição e, até mesmo, eliminação de perdas comerciais nos ambientes descritos. Esta solução, aplicada principalmente em grandes centros urbanos das regiões mais desenvolvidas do Brasil, emerge como novidade na aplicação de redes inteligentes de distribuição de energia elétrica no país.

Dentro deste contexto, este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de uma solução computacional, baseada em uma metaheurística, para apoio à formulação de projetos de redes de infraestrutura avançada de medição, que utilizam equipamentos de sistemas de medição centralizados em uma rede de distribuição de energia elétrica, garantindo máxima cobertura da rede, atendimento a todos os clientes geograficamente localizados na região de projeto, minimizando custos de instalação dos sistemas.

## 1.2 Objetivos e Contribuições

O objetivo primário deste trabalho é o estudo e modelagem de um problema de recobrimento, levando em consideração aspectos importantes, tais como a definição de uma topologia de rede funcional com o menor custo de instalação e maior cobertura possível, garantia de um topologia robusta e atendimento a todos os clientes envolvidos pela rede. Para isso, serão apresentadas a modelagem genérica do problema do recobrimento e a modelagem específica do problema, que consideram as variáveis envolvidas no projeto de uma rede de comunicações para instalação de sistemas de medição centralizados de energia elétrica.

O segundo objetivo é a implementação de um algoritmo computacional que realiza a busca pela solução do problema do recobrimento em um complexo espaço de buscas. O mesmo deve retornar uma solução otimizada e fornecer apoio à tomada de decisão durante a fase de planejamento da instalação dos conjuntos de medição. Nesta fase, será abordada a metaheurística *simulated annealing*, do termo em português “têmpera simulada”, ou “recozimento simulado”,

e as estratégias de buscas guiadas por este algoritmo. O alvo principal da implementação computacional é otimizar os recursos que serão utilizados na instalação dos sistemas de medição centralizados.

O objetivo proposto é descrever a implementação de um algoritmo computacional que forneça apoio à formulação de um projeto de implantação de sistemas de medição centralizados, minimizando custos de instalação de equipamentos de rede. Considerando a inexistência de métodos não empíricos ou não experimentais, no que refere-se a instalação de equipamentos de telemedição e faturamento de energia elétrica, espera-se que a ferramenta torne-se uma técnica promissora para a solução de planejamento destas novas redes.

A partir dos objetivos traçados, a maior contribuição deste trabalho será o desenvolvimento de uma metodologia que permita a utilização de técnicas não empíricas para a alocação de recursos de sistemas de medição centralizados e a comparação de algoritmos amplamente utilizados com o proposto neste trabalho.

O algoritmo será desenvolvido em LabVIEW®, uma linguagem de programação desenvolvida pela empresa National Instruments®<sup>1</sup>.

### 1.3 Organização do Documento

O trabalho está estruturado em 6 capítulos, sendo que o Capítulo 1 descreve a introdução, motivação, objetivos e contribuições e organização do trabalho.

O Capítulo 2 explica alguns conceitos básicos para entendimento da proposta apresentada. Redes de distribuição de energia elétrica, dos conceitos convencionais às mudanças de paradigmas tornado-as inteligentes através de infraestruturas complexas de medição e de comunicação, o funcionamento de uma rede de infraestrutura avançada de medição são tópicos inicialmente tratados para caracterização do problema a ser abordado. A partir deste ponto, a forma representativa de uma rede, através de teoria de grafos e modelagem numérica, são apresentados. Este mesmo capítulo aborda, ainda, a caracterização do problema a ser solucionado, comparando-o ao problema do recobrimento. O capítulo encerra com a visão geral do algoritmo de otimização, conhecido como *têmpera simulada*, do termo em inglês *simulated annealing* e estratégias usadas pelo algoritmo na busca por melhores soluções.

O capítulo 3 retorna uma pesquisa bibliográfica de trabalhos relacionados ao tema, bem como a caracterização dos problemas e estratégias de solução apresentadas, que serviram de base para a formação da estratégia de otimização proposta neste trabalho. Apresenta, ainda, uma correlação dos trabalhos apresentados com o projeto desenvolvido.

Como parte importante do trabalho, o capítulo 4 destaca a modelagem matemática do problema, explicitando as funções objetivo e restrições apresentadas pelo problema. Em seguida, são apresentadas as estratégias de otimização, desde a geração de uma solução inicial, até a estratégia metaheurística utilizada, passando pelas estratégias propostas para formação das vi-

---

<sup>1</sup>([HTTP://WWW.NI.COM/LABVIEW/WHATIS/PT/](http://www.ni.com/labview/whatis/pt/), 2012)

zinhanças que serão empregadas pela metaheurística. A codificação para implementação computacional também é apresentada neste tópico. Estratégias do algoritmo principal de otimização, abordando questões de diversificação e intensificação são relacionadas a seguir. O capítulo encerra com a forma de apresentação da ferramenta computacional desenvolvida.

O capítulo 5 aborda o planejamento de uma simulação utilizando a ferramenta computacional e exemplifica o funcionamento do sistema através da otimização de uma pequena rede, que é comparada a uma rede real e instalada numa área geográfica determinada. Em seguida, avalia simulações de uma rede de maior porte e a influência na configuração de parâmetros adotados nas simulações, exemplificando prejuízos e ganhos observados.

Encerrando o documento, o capítulo de conclusão aborda os resultados obtidos nas simulações e propõe oportunidades para desenvolvimentos futuros, baseados no sistema computacional e na metodologia aplicada para formação de redes de comunicação sobre sistemas de medição centralizada.

## 2 CONCEITOS BÁSICOS

Este capítulo tem por finalidade descrever e conceituar tópicos importantes para a compreensão do trabalho. Inicialmente, serão abordados alguns conceitos básicos sobre redes elétricas de distribuição de energia para facilitar a compreensão da proposta apresentada. Temas como a evolução das redes, sua concepção inicial e o avanço tecnológico que permite que estas redes se tornem inteligentes, do termo em inglês *smart grids*, até a construção de infraestruturas avançadas de medição, redes AMI, do termo em inglês *Advanced Metering Infrastructure*.

Será mostrado como esta revolução tecnológica incorpora diversas melhorias aos sistemas de distribuição, ajudando concessionárias a oferecerem serviços de melhor qualidade com mais agilidade, não limitando-as à simples ligação elétrica de cabos condutores.

De outro lado, este modelo também incorpora melhorias significativas aos clientes, tais como a qualidade da energia recebida, diminuição das interrupções de fornecimento e melhor acompanhamento de gastos financeiros no que refere-se à utilização da potência elétrica.

Em seguida, os itens de maior interesse deste trabalho, que são a infraestrutura de comunicação e a infraestrutura de medição, receberão destaque por serem os elementos formadores de uma rede AMI. O principal conceito de uma infraestrutura avançada de medição é a unificação entre as estruturas de medição e de comunicações. As redes formadas por estes sistemas devem cobrir todos os clientes de uma determinada região (fornecimento e medição de energia elétrica) e garantir pelo menos um ponto de comunicação para todos os nós da rede.

São apresentados a conceituação e o modo de funcionamento de uma rede inteligente de medidores de energia, postos na última milha, do termo em inglês *last mile*, e como esta rede é formada. Aqui são apresentados conceitos de como as redes são instaladas e tornam-se funcionais na prática.

O conceito apresentado abrange redes inteligentes instaladas em áreas geográficas que tem como principais características: economias de baixa renda, difícil acesso e altas densidades populacionais. Áreas estas que apresentam a maior medida de perdas de receitas no que se refere ao faturamento das empresas concessionárias distribuidoras de energia elétrica.

Em seguida, a explicação de como este problema pode ser relacionado a um clássico problema de otimização, conhecido como Problema do Recobrimento, além de conceitos importantes sobre como descrever matematicamente uma rede de comunicações e sua representação em forma de grafos e de matrizes.

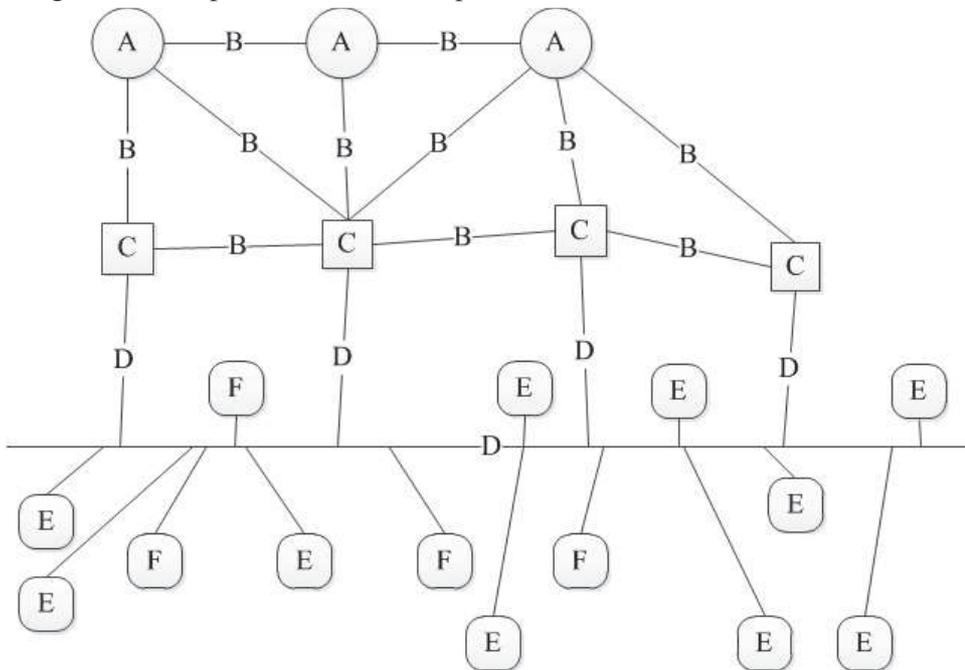
Este texto também ilustra alguns conceitos de busca metaheurística e o algoritmo que será utilizado na busca pela solução do problema, bem como estratégias de busca e formação das vizinhanças, critérios de aceitação, entre outros.

## 2.1 Conceitos Básicos de Distribuição de Energia Elétrica

### 2.1.1 Redes de Distribuição de Energia Elétrica

Se caracterizam por apresentarem um complexo sistema onde, várias redes de diferentes empresas em todas as etapas, da geração à utilização final, estão interligadas (figura 1). Acrescenta-se ainda o fato de que cada empresa tem suas próprias normas e metodologias de execução de serviços, mesmo estando regulamentadas por agências reguladoras. Por exemplo, modelos de cabos utilizados, emendas elétricas para conexões de redes, equipamentos de medição e controle seguem padrões especificados individualmente pelas operadoras de distribuição ligadas ao sistema elétrico.

Figura 1: Exemplo de uma rede complexa de um sistema elétrico convencional.



Fonte: Elaborada pelo autor.

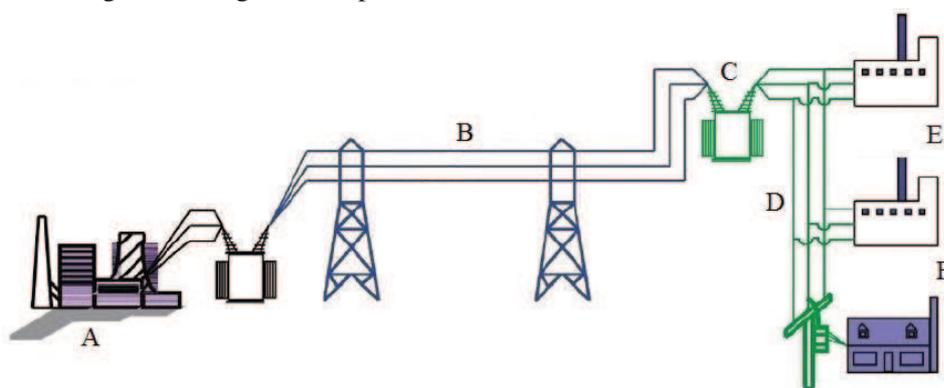
As redes convencionais, dotadas apenas de dispositivos eletromecânicos e de operações manuais, caracterizam-se por uma complexidade muito grande em todos os aspectos operacionais.

Evidentemente esta rede está caracterizada por sua estrutura unidirecional, formada por grandes usinas geradoras (**A**), que transferem a energia a um sistema de transmissão (**B**), transformação (**C**) e distribuição (**D**) para, enfim, chegarem até as unidades consumidoras finais (**E** e **F**). No caso de um aumento de demanda nos pontos **E** e **F**, obrigatoriamente a oferta em **A** também deverá ser aumentada e toda a rede deve ser reestruturada.

Este sistema, se acometido por algum tipo de falha em um único nó, pode todo sofrer uma interrupção.

A figura 2 ilustra o diagrama básico de uma rede.

Figura 2: Diagrama simplificado de um sistema elétrico convencional.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A etapa definida como **distribuição (D)** é o segmento do setor elétrico com os potenciais mais baixos, chamados de “baixa tensão” (BT), partindo da subestação rebaixadora (C) — etapa de transição entre transmissão e distribuição — até a entrega de energia para o consumidor final. Nesta fase, conhecida como “última milha”, do termo em inglês *last mile*, é realizado o rebaixamento das tensões até os níveis adequados de utilização em residências, comércio e indústrias.

É nesta fase de todo o sistema que também é gerado o faturamento de energia por parte das concessionárias distribuidoras. Em outras palavras, o retorno financeiro proporcionado pelo produto do trabalho das companhias geradoras, transmissoras e distribuidoras de energia elétrica.

A medição de energia utilizada é realizada por medidores registradores de demanda, os conhecidos “relógios de luz” (figura 3).

Figura 3: Medidor registrador eletromecânico de consumo de energia elétrica.



Fonte: [http://www.nansen.com.br/produtos\\_medidores\\_eletromecanicos\\_monofasicos.php](http://www.nansen.com.br/produtos_medidores_eletromecanicos_monofasicos.php).

Estes dispositivos atualmente estão gradativamente sendo substituídos de eletromecânicos (sem funcionalidades adicionais, apenas registro de consumo de energia ativa) por medidores eletrônicos, capazes de realizarem leituras de consumo de potências ativas e reativas, além de agregarem funções adicionais, como comunicação de dados e corte/religa de energia por telecomandos.

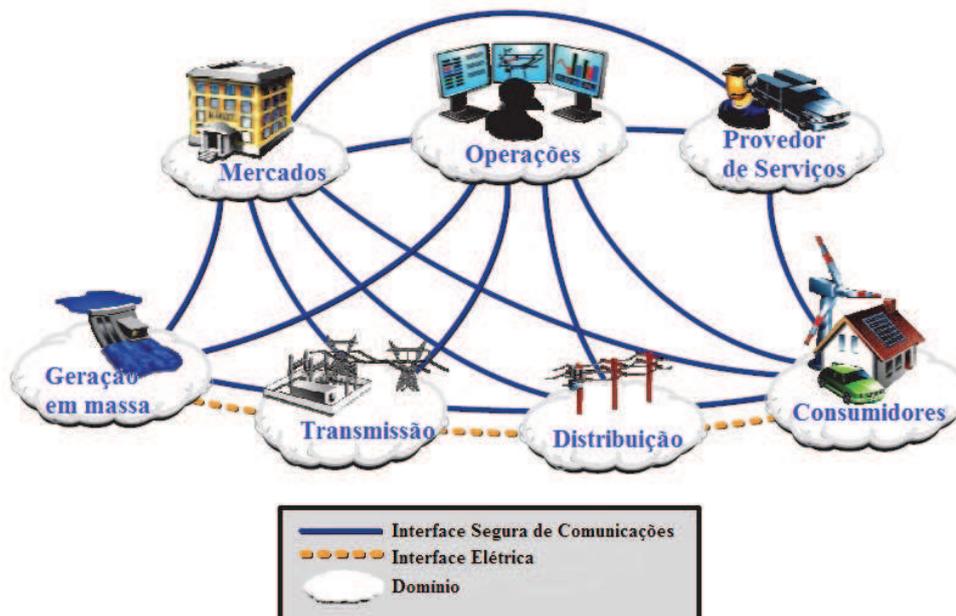
Os medidores registradores, alocados nas unidades de consumo, medem a energia elétrica consumida em  $kW \cdot h$ . O faturamento, com base na coleta manual desta medição, é a relação direta entre energia consumida e custo operacional de geração, transmissão e distribuição, somados aos ganhos das empresas concessionárias.

### 2.1.2 Das Redes de Distribuição Convencionais às Redes Inteligentes de Distribuição

Com a crescente demanda de energia elétrica no mundo todo, as companhias geradoras, transmissoras e distribuidoras, juntamente com os governos, reúnem esforços com a finalidade de tornar as redes cada vez mais eficazes e confiáveis, atendendo a diversas necessidades, como sustentabilidades econômica e ambiental, eficiência operacional e qualidade de produto.

Um estado possível para o futuro de uma rede inteligente de fornecimento de energia elétrica é mostrado na figura 4.

Figura 4: Modelo conceitual de uma rede elétrica inteligente.



Fonte: Adaptado de Hardin (2011).

Em uma rede inteligente, o modelo conceitual de interoperabilidade entre as redes descreve os sete domínios primários que compõem a rede inteligente (HARDIN, 2011) (ALCÂNTARA, 2011):

- Geração em massa de energia elétrica;
- Transmissão eficiente;
- Distribuição com automação e sensores;
- Clientes residenciais, consumidores e fornecedores;
- Comércio, indústria e governos;
- Central de controle inteligente;
- Serviços, como informações de consumo em tempo real, programas de gerenciamento de energia e medidores eletrônicos inteligentes.

Os dois domínios de maior impacto direto na cadeia de fornecimento de energia elétrica são os clientes e a geração. Os outros domínios geralmente serão adaptados às alterações destes dois domínios principais, mas todos deverão estar interconectados e, portanto, afetando uns aos outros (HARDIN, 2011).

A nível físico, conforme Alcântara (2011), cinco são os níveis fundamentais que compõem uma rede inteligente:

- Novos componentes de rede: geração distribuída, como painéis solares e pequenas turbinas eólicas;
- Dispositivos de sensores e controle: medidores eletrônicos microprocessados, com capacidade além da medição de consumo de potência elétrica, mas dotados de medidas de qualidade de energia, comunicações e comandos remotos;
- Infraestrutura de comunicações: permite a troca de informações e controle em tempo real;
- Automação e TI: aplicações automáticas para operação da rede; e
- Análise avançada: aplicações avançadas para apoio a tomadas de decisão.

A partir destas definições, são identificados dois itens que são o principal interesse deste trabalho: **infraestrutura de comunicações** e **infraestrutura de medição**, pois são a estrutura básica na formação de uma rede AMI.

### 2.1.3 Infraestrutura de Comunicações

Para que uma rede inteligente de distribuição seja viável, é necessário inicialmente uma rede de comunicação de dados eficiente. Desafios como largura de banda, taxa de transmissão de dados, segurança e criptografia são requisitos básicos para a implementação de qualquer sistema de telemedição e teleprocessamento. De acordo com Hernandez et al. (2011), estas

redes se utilizam fortemente de tecnologias como *ZigBee*, *Wi-Fi Mesh*, rádios Tetra, bem como redes públicas GPRS e 3G.

Estas tecnologias são aplicadas como forma de complemento ou contingência. A escolha do modo de comunicação normalmente é feita com base nas aplicações a serem utilizadas e a apresentação do perfil topográfico do local. Dentro do contexto estudado e apresentado neste trabalho, estão as redes *Wi-Fi Mesh* e redes públicas GPRS.

### 2.1.3.1 Redes *Wi-Fi Mesh*

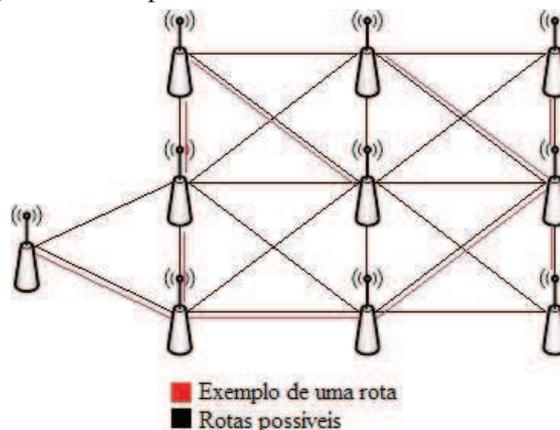
Redes *Mesh* sem fios são redes auto configuráveis e auto organizadas, com os nós estabelecendo comunicações do tipo *ad-hoc* e mantendo a conectividade (KAPSE; SHRAWANAKAR, 2011). Estas redes são compostas de clientes e roteadores, também chamados nós, que mantêm um enlace de rede seguro e confiável para prover os serviços de rede a seus clientes.

Este tipo de rede é muito atrativo em áreas onde a infraestrutura de redes é escassa ou a expansão é proibitiva (AHMED et al., 2011).

Redes *Mesh* tem conceito similar à redes *ad-hoc*, tendo como principal diferença a não mobilidade de seus clientes, evitando assim mudanças frequentes de topologias e falhas de comunicação. Mudanças de topologia somente são admissíveis para a ligação de nós adicionais ou falha em um dos *links* da rede. Estas falhas podem ser por obstrução física de enlace de dados ou perda de potência em algum dos rádios.

O princípio básico de funcionamento de uma rede em malha é que todos os seus nós tentarão estabelecer enlace de comunicação com o vizinho mais próximo, não importando qual seja o vizinho. Para isso, um algoritmo interno aos rádios tentará varrer o espaço de comunicação com todos os vizinhos com possibilidade de conexão e selecionará o de menor perda. Todos os nós presentes nesta rede se reconfiguram desta maneira (exemplo da figura 5).

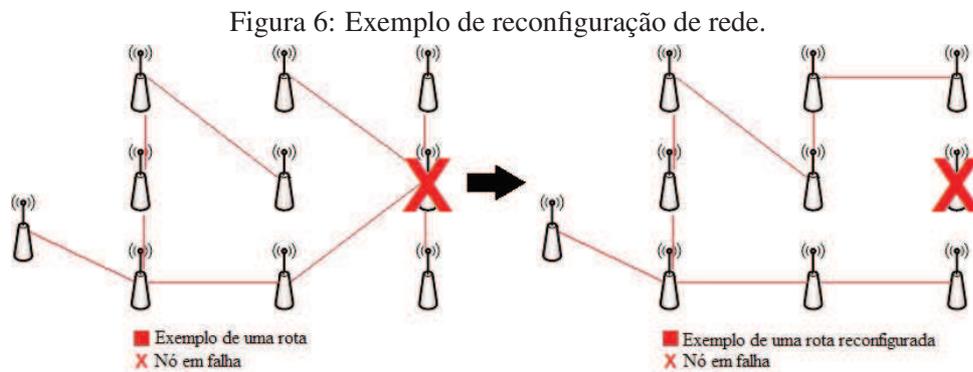
Figura 5: Exemplo de conectividade de uma rede *Mesh*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

No caso de uma falha em um dos nós, o sistema se reconfigura buscando alternativas para

uma nova rota, como mostrado na figura 6).

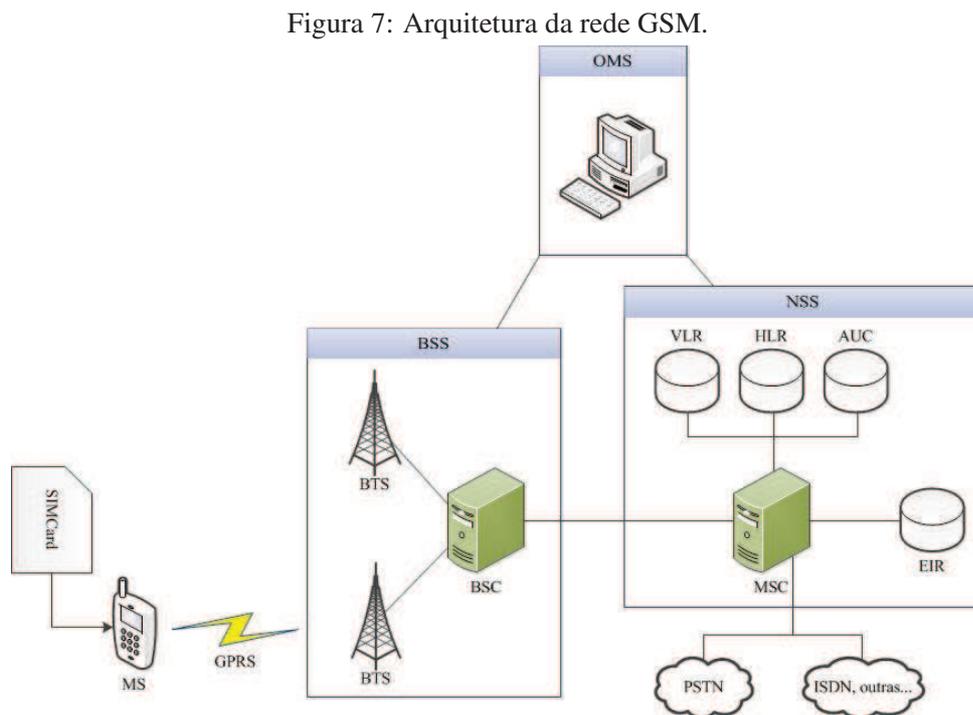


Fonte: Elaborada pelo autor.

### 2.1.3.2 Redes GPRS

A rede GPRS, do termo em inglês *General Packet Radio System*, foi concebida para utilizar serviços de uma rede GSM (*Group Special Mobile*) e acrescentar serviços de troca de dados por pacote sobre uma rede de serviços de voz já implementada, a partir do acréscimo de equipamentos na infraestrutura de rede (PIROTTI; ZUCCOLOTTO, 2009a).

Originalmente, uma rede GPRS pode ser dividida em três subsistemas e é formada pela seguinte arquitetura (figura 7):



Fonte: Elaborada pelo autor.

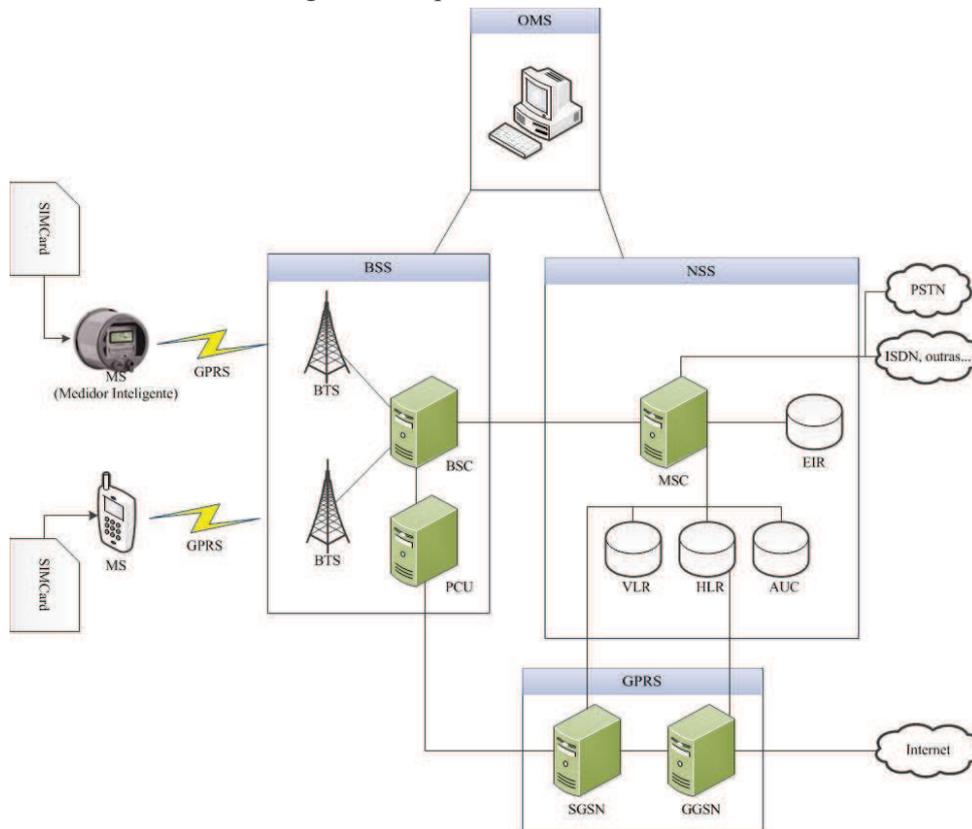
- **OMS** (*Operations and Maintenance System*) — subsistema de suporte e operação.
- **BSS** (*Base Station Subsystem*) — subsistema das estações radiobase; e
- **NSS** (*Network and Switching Subsystem*) — subsistema de gerenciamento e comutação.

O equipamento pessoal de comunicação, ou telefone celular (MS — *mobile station*) é quem utiliza a infraestrutura de comunicações da rede.

O serviço GPRS se utiliza da base GSM instalada para suportar os serviços de dados disponibilizados pelo *upgrade* da rede de telefonia móvel. Com a adição de equipamentos compatíveis com a rede, é possível a transferência de dados com velocidade e confiabilidade, possibilitando a troca de informações bidirecional de maneira segura (PIROTTI; ZUCCOLOTTO, 2009b).

Os novos equipamento introduzidos remodelaram as arquiteturas das redes (figura 8) e adicionaram novos elementos:

Figura 8: Arquitetura da rede GPRS.



Fonte: Elaborada pelo autor.

- **PCU** (*Packet Control Unit*) — interfaces lógicas e físicas para tráfego de dados;
- **SGSN** (*Serving GPRS Support Node*) — servidor de suporte de nó, que processa a autenticação e o serviço na rede GPRS;
- **GGSN** (*Gateway GPRS Support Node*) — provê a conexão de dados GPRS com a rede externa através de um roteamento.

### 2.1.4 Infraestrutura de Medição

Dentro do contexto de redes inteligentes, a Infraestrutura Avançada de Medição (AMI) consiste de medidores de energia elétrica com inteligência embarcada e providos de portas de comunicação de dados e demais periféricos, suportados por uma infraestrutura de serviços de tecnologia da informação que permite a aquisição de dados remotamente, bem como o envio de informações e comandos a distância (HERNANDES et al., 2011). Deste entendimento, é possível descrever uma infraestrutura de medição avançada como o produto de uma infraestrutura de medição e uma infraestrutura de comunicações.

Ainda neste contexto, Xiao-min, Jun-xia e Ning-hui (2010) mencionam que uma rede AMI pode ser composta por medidores de eletricidade, água e gás, além de outras facilidades. Tem como componentes os próprios medidores, redes de comunicação e *software* (aplicações) para medir, coletar, armazenar e analisar dados de consumo de eletricidade e operação do sistema (figura 9). É considerado o primeiro passo na implementação de uma rede inteligente.

Figura 9: Composição, estrutura e diagrama de fluxo de dados de uma rede AMI.

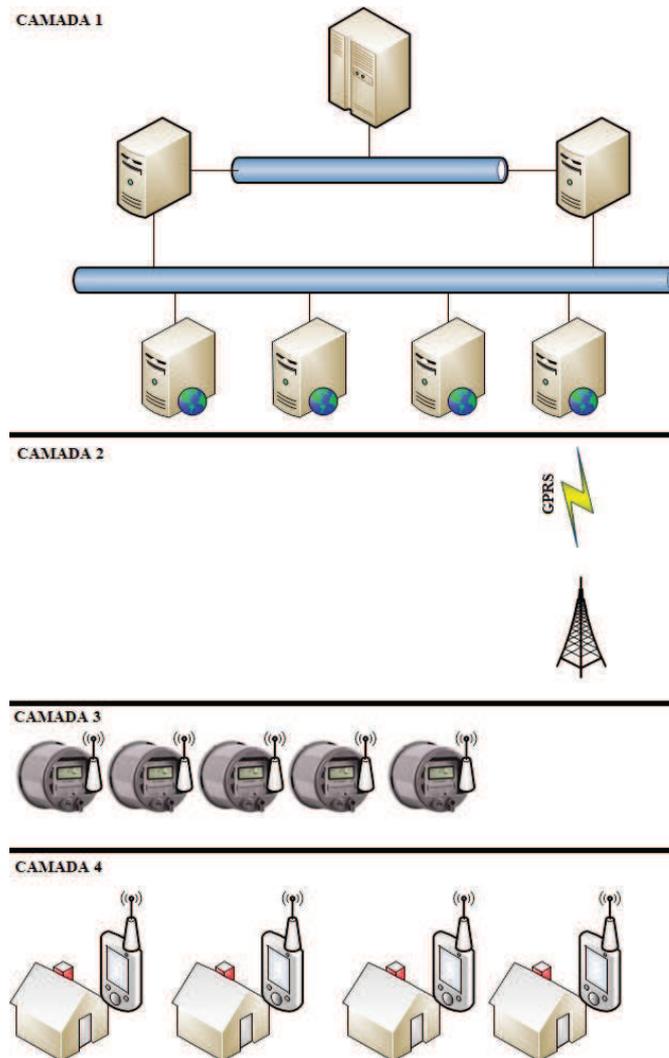


Fonte: Adaptado de Xiao-min, Jun-xia e Ning-hui (2010)

O sistema pode ser dividido em quatro camadas (LUHUA et al., 2010)(figura 10):

- **Camada 1** — representa o centro de gerenciamento de dados do sistema. Inclui equipamentos de rede, servidores e banco de dados;
- **Camada 2** — é representada pelas estações de comunicação entre uma rede de medição e o sistema de gerenciamento;
- **Camada 3** — é composta pelo sistema de medidores inteligentes ligados em rede;
- **Camada 4** — é a camada mais baixa da topologia. Nela estão instaladas as aplicações para clientes, como gerenciamento de consumo e mostradores remotos.

Figura 10: Divisão em camadas de um sistema AMI.

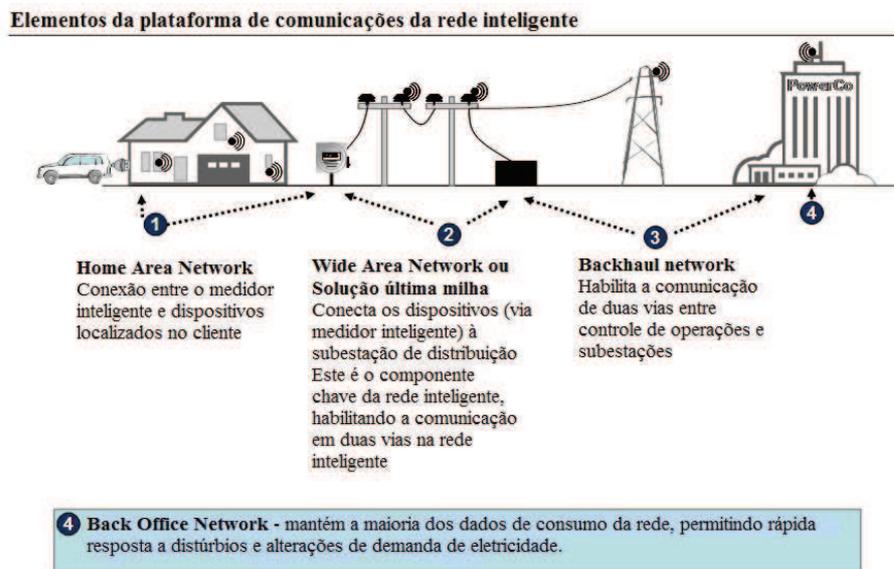


Fonte: Elaborada pelo autor.

Esta configuração pode também ser representada pelo tipo de rede que compõe a rede inteligente, separando em elementos de rede de acordo com a abrangência da rede local em que a camada está inserida (figura 11):

1. **Home Area Network (HAN)** — conexão entre o medidor e a aplicação no cliente;
2. **Wide Area Network (WAN)** — conexão entre o grupo de medidores ou sistemas de medição, formando uma rede local;
3. **Backhaul Networks** — conexão entre as redes ou entre as redes e a central de controle ou operações; e
4. **Back Office Network** — armazenamento e manipulação de dados de consumo, permitindo resposta rápida a qualquer distúrbio ocasionado no sistema elétrico.

Figura 11: Elementos da plataforma de comunicações de uma rede inteligente — última milha.



Fonte: Adaptado de Australian Government Minister for the Environment, Heritage and the Arts (2009)

Com esta estrutura, o sistema AMI realiza uma interação de duas vias. Baseado em aplicações sem fios, o sistema AMI pode realizar o monitoramento de consumo e controle sem que os aparelhos de medição estejam disponibilizados diretamente na entrada de energia elétrica do cliente final, garantindo assim maior segurança tanto em respeito a riscos elétricos para o usuário, como em garantia de receitas das concessionárias (adulteração em medidores) com as chamadas **perdas comerciais**, principalmente em regiões de alta densidade populacional e escassez de recursos financeiros.

## 2.2 Como Funciona uma Rede AMI

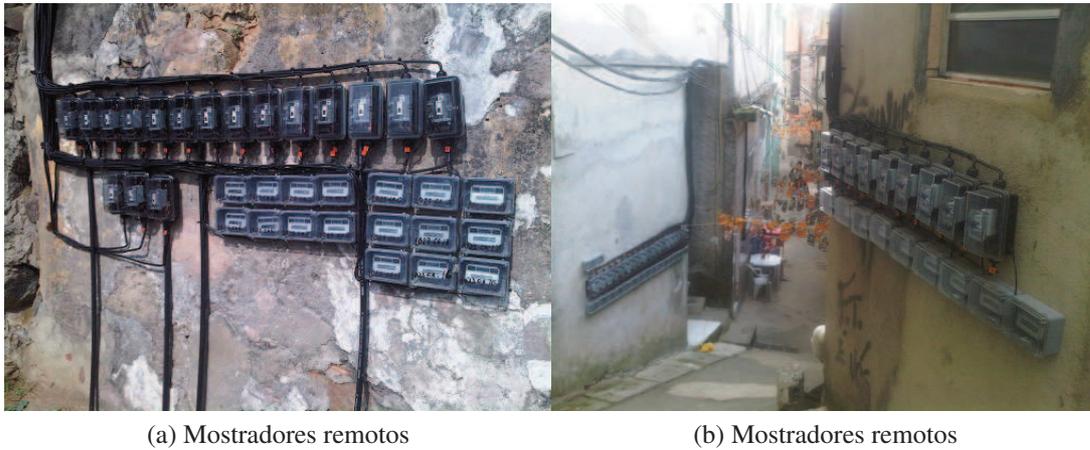
Conforme visto nas seções 2.1.3 e 2.1.4, um sistema de medição centralizado opera nas camadas mais baixas, interessando apenas os recursos instalados nas camadas três e quatro, definidas pela medição, centralização de dados e aplicação a clientes.

Nestes sistemas, o cliente final não tem acesso direto aos equipamentos de medição de energia. Através de uma aplicação instalada no cliente, este pode controlar a demanda e visualizar o consumo da energia elétrica (figura 12).

De forma análoga, a concessionária de distribuição de energia elétrica tem acesso aos dados de registro de consumo de cada unidade consumidora por meio de comandos enviados através da rede GPRS ao equipamento mestre (ou concentrador) da rede AMI e este enviando os comandos pela rede local até que o nó objetivo seja alcançado, por meio de transmissão de rádio frequências (figura 13).

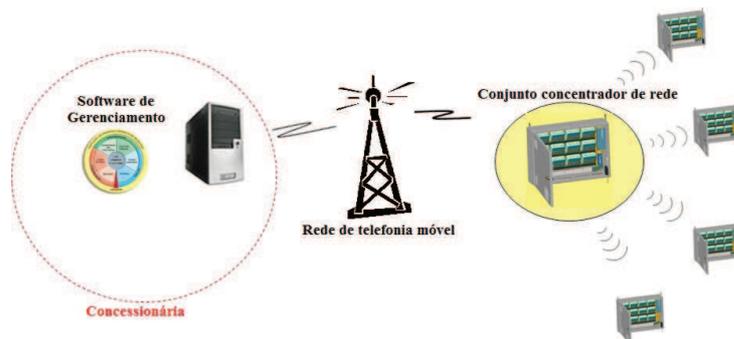
Visivelmente, as grandes vantagens deste sistema são justamente seu gerenciamento remoto e a impossibilidade de furtos de energia ocasionados por ligações clandestinas ou adulterações

Figura 12: Exemplo de aplicação para controle de demanda e registro de consumo (camada de aplicação).



Fonte: Cortesia de Elster Medição de Energia Ltda.

Figura 13: Comunicação remota entre a Central de Operações e algum nó objetivo, passando pelo nó concentrador (equipamento mestre da rede).



Fonte: Elaborada pelo autor.

em equipamentos de medição, proporcionados pela coleta de dados e controle da energia distribuída em tempo real.

Por outro lado, a determinação de uma configuração de rede precisa ser muito bem dimensionada no momento do projeto executivo, pois a alteração das redes convencionais de distribuição de energia elétrica em redes inteligentes requer uma dispendiosa soma financeira (figura 14a).

Para a instalação dos equipamentos, existe a necessidade de mão de obra técnica especializada, desligamento temporário do sistema de fornecimento de potência elétrica, deslocamento de equipes, instalação, configuração e ativação dos equipamentos, além de manobras de rede e ligação de ramais consumidores (figura 14b).

Figura 14: Processo de instalação de um sistema de medição centralizado.



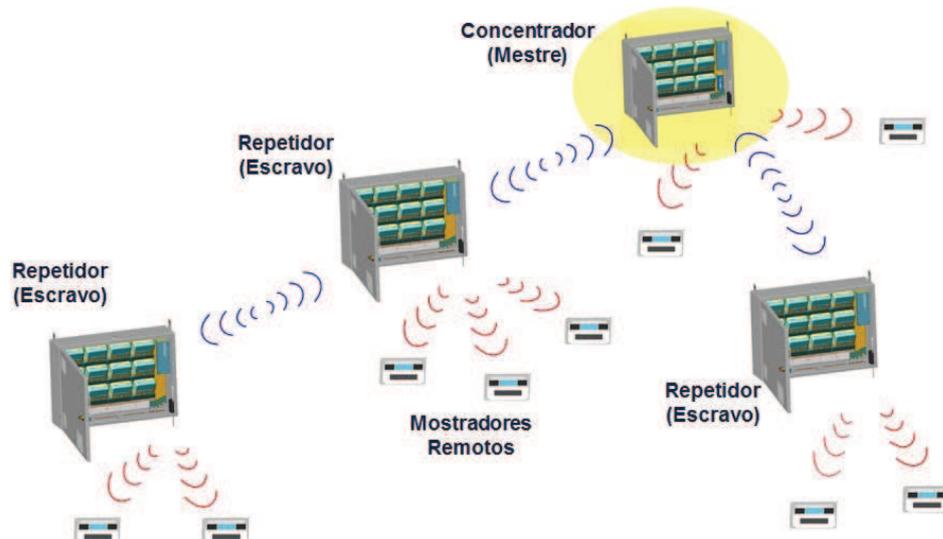
Fonte: Cortesia de Elster Medição de Energia Ltda.

### 2.2.1 Arquitetura da Rede AMI

A arquitetura da rede segue os conceitos vistos nas seções anteriores: os medidores eletrônicos estão todos centralizados dentro de uma caixa, dotada de equipamentos de comunicação por rádio frequências. Normalmente, utiliza-se um único equipamento concentrador (mestre da rede), que faz a coleta dos dados de todos os nós (escravos) da rede, faz a centralização dos dados e envia-os por pacotes via GPRS através de rede pública de telefonia móvel celular.

Na rede local, os equipamentos de medição centralizados fazem uso de uma rede *Mesh* para comunicação entre os nós e entre as aplicações instaladas nos clientes consumidores (figura 15).

Figura 15: Comunicação entre sistemas centralizados de medição e aplicações, formando uma rede local.



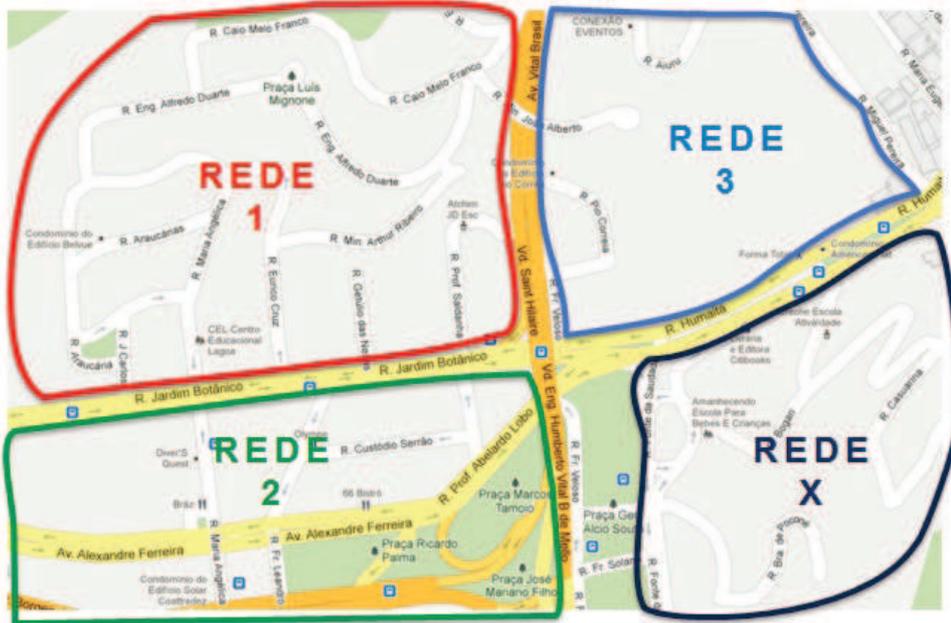
Fonte: Elaborada pelo autor.

Toda a comunicação entre a rede local de serviços e a concessionária é realizada através do concentrador, que é o único equipamento da rede local que disponibiliza a comunicação GPRS e a rede local *Mesh* simultaneamente.

## 2.2.2 Determinação da Instalação dos Recursos de uma Rede AMI

O primeiro passo para a instalação dos recursos de infraestrutura de uma rede de telemedição é a determinação da área geográfica de abrangência do sistema (figura 16).

Figura 16: Determinação da área geográfica para a instalação dos recursos de medição centralizada.



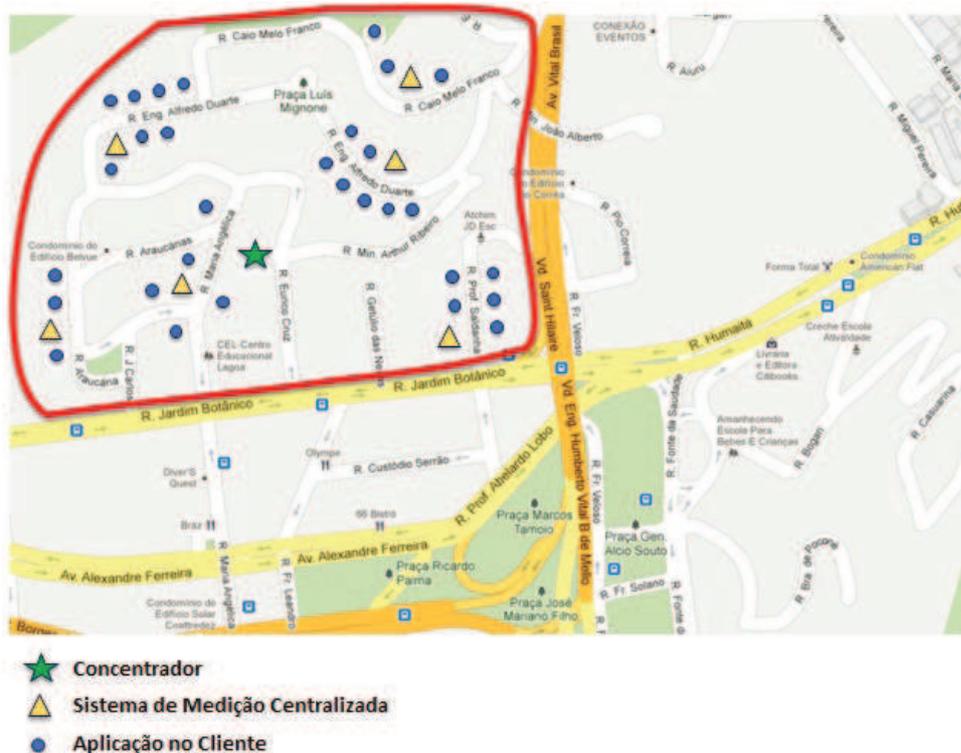
Fonte: Elaborada pelo autor.

Esta fase é importante para que se possa modelar a quantidade de clientes que serão atendidos pela rede local (figura 17). É também necessário conhecer as plantas de construção elétrica do local (projeto de construção das redes de distribuição de energia elétrica convencional). Normalmente, as áreas de atendimento ocupam todos os medidores possíveis de serem instalados. Isto quer dizer que todas as caixas do sistema de medição centralizados estarão com ocupação máxima.

Determinada a área a ser coberta pela rede local, é importante planejar as instalações de posse das plantas de construção elétrica do local (figuras 18 e 19). Para o caso de instalação de equipamentos na rede elétrica de distribuição, devem ser tomados alguns cuidados especiais que envolvem, inclusive, a segurança dos profissionais que operam as manobras de redes elétricas que devem ser realizadas no ato da instalação dos dispositivos. Estes componentes deverão ser previamente identificados para possibilitar a instalação sem comprometer a rede de distribuição, clientes e técnicos envolvidos no processo.

Estes elementos principais podem ser identificados como:

Figura 17: Determinação da área geográfica para a instalação dos recursos de medição centralizada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

- **Sistemas de medição centralizados** — deve-se verificar a existência ou não de equipamentos já instalados no sistema e identificar a possibilidade de uso destes ou a real necessidade de instalação de um novo equipamento. Isto determina a opção de descartar ou manobrar equipamentos já instalados;
- **Existência de transformadores** — é necessário identificar a existência de transformadores no local onde se tem a pretensão da instalação dos equipamentos de medição centralizada. Como regra, deve-se evitar a instalação do sistema em postes onde exista algum transformador instalado por representar riscos à segurança. No caso de necessidade imprescindível de compartilhamento de um poste onde exista um transformador, este deve ser manobrado e colocado à distância segura dos equipamentos de medição, o que eleva o custo financeiro da instalação;
- **Outros elementos impeditivos** — elementos construtivos de uma rede de energia elétrica, mas que não oferecem riscos à operação, tais como tirantes (estais), mão francesa ou outros elementos de construção de redes que possam se tornar impeditivos por questões construtivas.

Atualmente, as escolhas dos pontos de instalação são realizadas embasadas em conhecimento empírico e pesquisas de campo, onde um técnico sai às ruas munido das plantas construtivas e determina onde serão instalados os pontos de medição centralizados para que todos

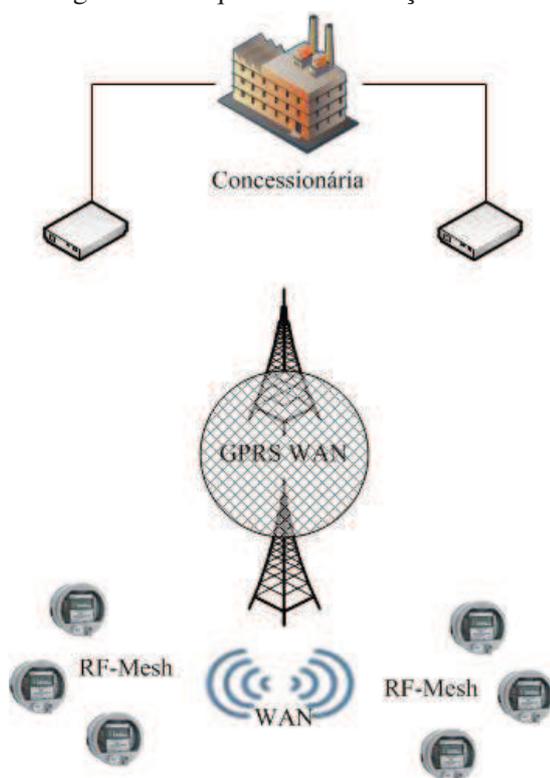




infraestrutura adota redes locais sem fios e em malha, permitindo rápido restabelecimento no caso de a rede de comunicações sofrer algum tipo de falha.

A arquitetura da solução é apresentada em forma de uma rede local ligada à uma central de operações através de uma rede pública de comunicações (figura 20). Isto permite o envio de comandos remotos (como corte de energia e religamento, por exemplo), coleta de dados agendadas ou sob demanda, bem como a indicação de fraudes sem deslocamento de equipes ou técnicos até o local.

Figura 20: Arquitetura da solução AMI.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O sistema é composto de medidores monofásicos, conjuntos concentradores (ligação LAN / WAN) que fazem a comunicação GPRS da rede até a central, nós repetidores (LAN) e mostradores remotos (HAN) que são a aplicação no cliente.

O conjunto de comunicação RF tem potência de transmissão máxima de 1 *Watt* e opera em frequências entre 915 *MHz* e 928 *MHz*, permitindo alcance máximo de 1 *km* entre caixas e entre aplicação (em “linha de visada”) com taxas de transmissão de 38,4 *kbps*. As rotas de comunicação entre os conjuntos são efetuadas dinamicamente, caracterizando uma rede tipo *Mesh*.

## 2.3 Representação Gráfica e Numérica de Redes de Telecomunicação

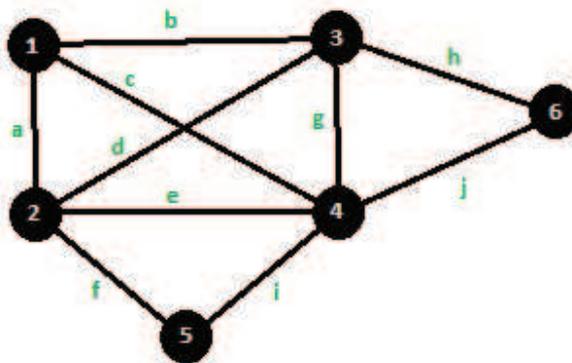
### 2.3.1 Teoria de Grafos

Grafos são importantes ferramentas matemáticas com aplicações em diversas áreas do conhecimento, empregados com sucesso na solução de problemas computacionais. Um grafo é matematicamente representado como uma tupla:

$$G = (V, A, \psi_G), \quad (2.1)$$

onde  $V$  representa os vértices (ou nós),  $A$  representa as arestas, também chamadas de ligações entre os vértices e  $\psi_G$  a função que associa cada aresta do Grafo  $G$  a um par de vértices  $V$  (FE-OFILOFF; KOHAYAKAWA; WAKABAYASHI, 2011). A figura 21 mostra o exemplo de um grafo representado pelo conjunto  $G = (V, A)$ , onde  $V = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  é o conjunto que representa os nós, enquanto as arestas são representadas pelo conjunto  $A = \{a, b, c, d, e, f, g, h, i, j\}$ .

Figura 21: Exemplo de um grafo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Piqueira (2008) representou uma rede de telecomunicações na forma de grafos, pois defende que uma rede se utiliza deste conceito para estudar as relações de pares de elementos em determinados conjuntos. Uma aresta que liga os nós  $i$  a  $j$  é representado pelo par  $(i, j)$ . Estes arcos podem apresentar uma orientação ou ausência desta.

Um grafo orientado define a direção, ou sentido, do tráfego de informações. Um grafo não-orientado permite o fluxo de dados em ambos os sentidos.

Segundo Barreto (2011), pode-se representar uma rede de telecomunicações utilizando a Teoria de Grafos, trabalho que apresentou os nós como representação dos roteadores:

$$V = \{1, 2, \dots, ||V||\}. \quad (2.2)$$

A representação dos *links* existentes entre os nós é representada pelas arestas:

$$A = \{i, j\}, \quad (2.3)$$

uma matriz binária na qual  $i$  e  $j$  representam os índices, linhas e colunas, respectivamente, que contém os valores 0, para ausência de *link*, ou 1, para a presença de ligação entre dois vértices.

Para este trabalho, serão considerados grafos simples e não-orientados representando a rede de sistemas de medição centralizados, pois todos os equipamentos envolvidos na infraestrutura de comunicação são transceptores.

A representação matemática de um grafo, obtida de sua representação geométrica, pode ser idealizada por, pelo menos, três formas (GOLDBARG; LUNA, 2000):

- Matriz de adjacências;
- Matriz de incidência;
- Listas encadeadas.

Neste trabalho, a representação matemática dos grafos é apresentada na forma de matrizes de adjacências, pois esta forma expressa de maneira simples como os vértices se relacionam (adjacências) em um grafo.

### 2.3.2 Representação de um Grafo por Matriz de Adjacências

É uma representação simples onde um grafo é expresso por uma matriz  $A = [a_{ij}]$  através dos nós e das relações entre as arestas. Estas matrizes são normalmente representadas por 0–1 (booleana) (BARRETO, 2011). A função de ligação  $\psi_G$ , por definição, pode ser expressa pela equação (2.4):

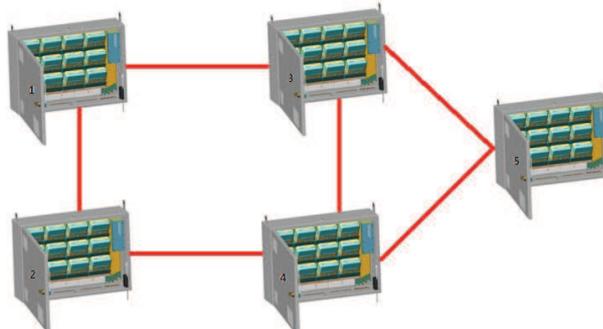
$$\psi_G = \begin{cases} a_{ij} = 1 & \text{se existir ligação } (i, j), \\ a_{ij} = 0 & \text{se existir não ligação } (i, j). \end{cases} \quad (2.4)$$

Como exemplo, a rede de comunicações, representada na figura 22 como uma rede estabelecida entre sistemas de medição centralizados, pode ser representada por um grafo simples. A figura 23 ilustra suas ligações na forma de um grafo.

A partir do grafo formado pela observação da rede, rapidamente é possível identificar a matriz de adjacências formada pela função de ligação dos nós  $\psi_G$ , exemplificada na equação (2.5):

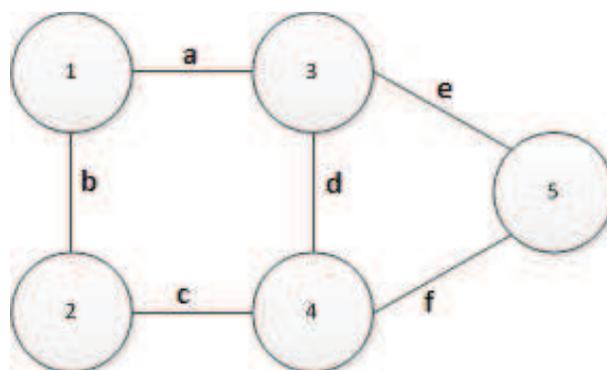
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

Figura 22: Uma rede de comunicações e suas ligações.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 23: Uma rede de comunicações e suas ligações representada por teoria de grafos para a formação da matriz de adjacências.



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 2.4 O Problema do Recobrimento

O principal objetivo de uma rede de comunicações de um sistema de medição centralizado para a formação de uma infraestrutura avançada de medição é cobrir uma área geográfica, de modo a ter todos os clientes (unidades consumidoras), pertencentes a esta área, atendidos pela infraestrutura de medição (conjuntos de medição centralizados). Isto garante uma infraestrutura mínima de comunicações entre as caixas de medição de tal forma que não seja necessário o deslocamento de técnicos para efetuar serviços mais simples, como leitura de consumo e corte ou religamento de energia. Mas também existe a preocupação de minimizar as perdas em caso de falhas na rede formada pelos próprios equipamentos de comunicação.

Este problema pode ser tratado como o Problema do Recobrimento, um problema clássico de otimização combinatória. As definições do problema do recobrimento apresentam as funções objetivo e de restrições como uma função de otimização partindo de certas definições simples.

O **vetor existência** (unidimensional) define o número de nós existentes que representam as regiões aptas a receberem o dispositivo de medição centralizado. Cada elemento do vetor representa uma variável binária que indica a instalação ou não do equipamento, mostrado na

equação (2.6):

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^t . \quad (2.6)$$

Na equação (2.6),  $t$  representa o operador de transposição do vetor e a variável  $x_i$  é um elemento inteiro e binário, definido pela equação (2.7):

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{se houver instalação no ponto } i; \\ 0, & \text{se não houver instalação.} \end{cases} \quad (2.7)$$

Esta definição é válida para:

$$x_i \in \{0, 1\} \ \forall i = 1, \dots, n , \quad (2.8)$$

onde  $n$  define o número de regiões do problema.

De forma análoga, o **vetor custo** também é unidimensional e associa o custo de instalação de cada equipamento na região  $i$ :

$$\mathbf{c} = [c_1 \ c_2 \ \cdots \ c_n] . \quad (2.9)$$

A partir das definições destes dois vetores, é possível se obter a **Função Objetivo** do problema, retornada pela equação (2.10):

$$\text{Minimizar: } z = \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i , \quad (2.10)$$

onde  $n$  representa o número de regiões.

Para a formulação das **restrições** é criada a **Matriz Densidade D** (bidimensional, expressa na forma da equação (2.11):

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix} , \quad (2.11)$$

onde  $n$  é o número de regiões e cada elemento da matriz é definido por:

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } i = j \text{ ou se } i \text{ é adjacente a } j; \\ 0, & \text{caso contrário .} \end{cases} \quad (2.12)$$

Para garantia de que todas as regiões de instalação estejam cobertas, é necessário assegurar que todas as instalações possuam pelo menos uma adjacência. A partir desta situação, o vetor de restrições  $\mathbf{u}$  (unidimensional) é definido pela equação (2.13):

$$\mathbf{u}_i = \sum_{i=1}^n d_{ij} \cdot x_i \geq 1 \quad j = 0; 1; \dots; n. \quad (2.13)$$

O vetor de restrições também pode ser representado pela forma matricial, conforme mostra a equação (2.14):

$$\mathbf{u} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{x} \geq \mathbf{1} \quad (2.14)$$

Para a equação (2.13), os elementos do  $x_i$  do vetor  $\mathbf{x}$  foram definidos na equação (2.6) e os elementos  $d_{ij}$  da matriz  $\mathbf{D}$  foram definidos na equação (2.11).

Estando definidas as funções objetivo e as de restrições, com todas as variáveis de entrada, a formulação do problema do recobrimento pode ser aplicada como ilustra a equação (2.15):

$$\begin{aligned} \text{Minimizar: } z &= \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i \\ \text{Sujeito a: } \sum_{i=1}^n d_{ij} \cdot x_i &\geq 1; \quad j = 1, \dots, n \\ \text{com: } x_i &\in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, \dots, n, \end{aligned} \quad (2.15)$$

onde, na equação (2.15),  $c_i$  representa o elemento de índice  $i$  do vetor custos  $\mathbf{c}$ ,  $x_i$  é o elemento de índice  $i$  do vetor de existência  $\mathbf{x}$  e  $d_{ij}$  é um elemento da matriz densidade  $\mathbf{D}$ .

Na forma matricial, o problema do recobrimento pode ser descrito pela equação (2.16):

$$\begin{aligned} \text{Minimizar: } z &= \mathbf{c} \cdot \mathbf{x} \\ \text{Sujeito a: } \mathbf{D} \cdot \mathbf{x} &\geq \mathbf{1} \quad x_i \in \{0, 1\} \quad \forall i = 0, 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (2.16)$$

O Problema do Recobrimento pode ser reduzido a classes de problemas genéricos da pesquisa operacional. Este tipo de problema se caracteriza por estar na classe de problemas **NP-difícil**, isto é, uma classe de problemas cuja função de tempo computacional necessário para a resolução é não polinomial. Desta forma, a resolução do problema através de algoritmos exatos para instâncias com dados reais é inviável. A única forma de abordar esse problema é através da utilização de métodos heurísticos.

## 2.5 Otimização por Metaheurísticas

Otimização combinatória trata de problemas de funções de maximização e minimização de muitas variáveis, geralmente discretas, sujeitos a restrições de igualdades e desigualdades, e restrições de integralidade em algumas ou todas as variáveis (NEMHAUSER; WOLSEY, 1999). De um modo geral, uma grande variedade de problemas pode ser representada por problemas de otimização discreta. Muitos problemas de importância teórica e prática estão concentrados na escolha da melhor configuração, para um conjunto de parâmetros, para encontrar algum objetivo (PAPADIMITRIOU; STEIGLITZ, 1998).

Pequenos problemas de programação linear e programação não linear podem ser resolvidos por algoritmos exatos, garantindo a busca de uma solução ótima em tempo computacional razoável.

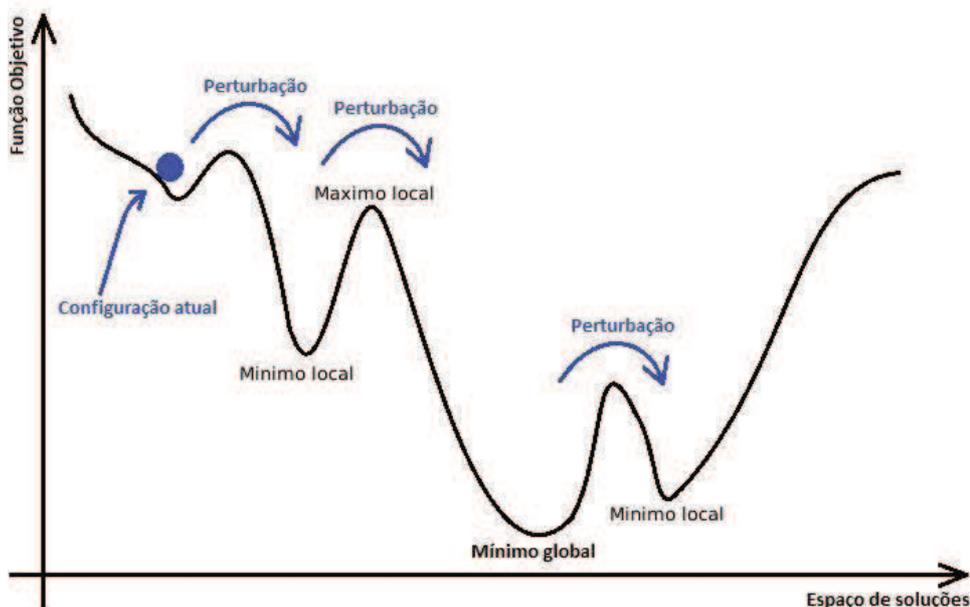
Quando o problema torna-se complexo e com muitas variáveis de entrada, pode se tornar intratável, fazendo com que a solução por métodos exatos torne-se inviável, considerando o tempo computacional para a busca e suas leis de formação (funções objetivo e de restrições) (AARTS; LENSTRA, 2003). Neste caso, uma busca metaheurística pode ser usada na procura de soluções para esta classe de problemas em tempo computacional aceitável, mas sem a garantia de que o resultado encontrado seja a solução exata, mas factível e adequada, com bons resultados.

A ferramenta metaheurística proposta para a busca de soluções para o problema tratado neste trabalho é conhecida como **têmpera simulada** (ou recozimento simulado), do termo em inglês *simulated annealing*.

### 2.5.1 Simulated Annealing (Têmpera Simulada)

É um método probabilístico de busca em trajetória (figura 24) proposto por Kirkpatrick, Gelatt e Vecchi (1983) para busca de mínimos locais de uma função custo. O algoritmo simula um processo físico no qual um sólido aquecido é lentamente resfriado até sua temperatura mínima, representando o estado de menor energia (BERTSIMAS; TSITSIKLIS, 1993). Pertence à classe de algoritmos de busca em trajetória, conhecidos como algoritmos de limiarização (ou de aceitação) (AARTS; LENSTRA, 2003). Este algoritmo é largamente usado por possibilitar que o processo de busca “escape” de ótimos locais (HILLIER; LIEBERMAN, 2005).

Figura 24: Trajetória típica de um algoritmo de busca *simulated annealing*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O procedimento de busca usado em um algoritmo *simulated annealing* tem foco principal na busca pelos “vales” (ou “picos”, no caso de uma busca por maximização) da função objetivo do problema em estudo. Dado que um vale pode estar em qualquer lugar da região factível, o início da busca é tomado em direções aleatórias com o objetivo de explorar o máximo possível da região factível.

A origem do algoritmo e seus critérios de aceitação tem sua analogia física ao processo de têmpera simulada de sólidos. Têmpera é um processo para obtenção do estado de mais baixa energia de um material previamente aquecido. O processo consiste em aquecer um material até a mais alta temperatura em que o sólido mantenha seu estado físico. Nesta fase, todas as partículas agitam-se de forma aleatória e o material encontra-se em estado de alta energia. Em seguida, a temperatura é controladamente decrementada até que as partículas do sólido estejam novamente arranjadas no estado fundamental do sólido. Neste estado, as partículas estão estruturadas no estado de mínima energia (AARTS; LENSTRA, 2003).

Metropolis et al. (1953) propôs um algoritmo baseado em *técnicas de Monte Carlo* para simulação da evolução de um sólido aquecido e resfriado, até que o equilíbrio térmico seja atingido:  $E_i$  representa a energia do estado atual,  $E_j$  a energia do próximo estado,  $T$  retorna a temperatura e  $k_B$  é a constante física de *Boltzmann*. Pode-se perceber que se a diferença  $E_j - E_i \leq 0$ , o estado  $j$  é aceito como novo estado atual. Caso contrário, o novo estado é aceito com uma certa probabilidade (AARTS; LENSTRA, 2003) mostrada na equação (2.17):

$$Prob = \exp\left(\frac{E_i - E_j}{k_B \cdot T}\right). \quad (2.17)$$

Com base neste critério, denominado **critério de Metropolis**, gera-se uma sequência de soluções de um problema de otimização combinatória através da seguinte analogia:

- as soluções do problema de otimização combinatória equivalem aos estados do sistema físico;
- o custo de uma solução é equivalente à energia do estado.

Então, fazendo (HILLIER; LIEBERMAN, 2005):

- $f(s)$  o valor da função objetivo no estado atual;
- $f(s')$  o valor de uma solução candidata; e
- $T$  um parâmetro que mede a tendência de aceitação de um estado candidato tornar-se estado atual, mesmo sem melhoria da função objetivo;

é aceito como regra de movimento de um problema de **minimização**:

- se  $f(s') < f(s)$ , sempre aceitar a solução candidata;

- se  $f(s') \geq f(s)$ , aceitar a solução candidata com a seguinte probabilidade (equação (2.18)):

$$Prob_{\text{aceitação}} = \exp\left(\frac{f(s) - f(s')}{T}\right). \quad (2.18)$$

Então, se a solução candidata é melhor que a solução atual, esta é aceita como nova solução. Se for pior (movimento inverso ao movimento de melhoria), a probabilidade de aceitação da nova solução dependerá do quanto a solução candidata é pior e do critério  $T$ .

O algoritmo clássico de uma otimização *simulated annealing* é mostrado no algoritmo 1, onde  $p(T, s', s)$  representa a probabilidade de aceitação em função da temperatura ( $T$ ), da solução candidata ( $s'$ ) e da solução atual ( $s$ ).

*Algoritmo 1: Simulated annealing.*

```

s ← gera solução inicial factível
T ← T0
ENQUANTO o critério de parada não for satisfeito FAÇA
  s' ← escolher uma solução candidata aleatoriamente em N(s)
  SE ( f(s') < f(s) ) ENTÃO
    s ← s'
  SENÃO
    Aceitar s' como nova solução com probabilidade p(T, s', s)
  FIM SE
  Atualiza estado T
FIM ENQUANTO

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 2.5.2 Estruturas de Vizinhaça

Um algoritmo de otimização combinatória baseado em têmpera simulada realiza buscas através de um método conhecido por estruturas de vizinhaças. A vizinhaça é um conjunto de soluções geradas a partir de uma solução candidata.

As funções de vizinhaça dependem do problema em consideração. Gerar boas funções de vizinhaça tendem a gerar soluções locais de alta qualidade e é um dos desafios das buscas locais (AARTS; LENSTRA, 2003). Para expressar uma função de vizinhaça, é necessário primeiramente conhecer a função problema (ou de busca). Por exemplo, dado um ponto factível  $p \in P$  do problema, define-se um conjunto de pontos  $N(p)$  em torno de  $p$ . A vizinhaça será mapeada como mostra a equação (2.19):

$$N : P \rightarrow 2^P, \quad (2.19)$$

e definida para cada instância do problema (PAPADIMITRIOU; STEIGLITZ, 1998), que leva as soluções de  $P$  em um subconjunto deste mesmo conjunto de soluções (equação (2.20)):

$$N(p) = \{p_1, p_2, \dots, p_k\} . \quad (2.20)$$

Assim, com o conhecimento de representação de redes de distribuição de energia elétrica e o funcionamento de redes de infraestrutura avançada de medição, suas representações na forma de modelagem matemática e apresentação do problema na forma do clássico problema do recobrimento, é possível a aplicação da metaheurística para otimização de custos de instalação destas redes.



### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A abordagem de técnicas para projetos de redes de comunicações pode ter diferentes objetivos, caracterizando o problema de diferentes formas. O problema aqui abordado se encontra no formato de um clássico problema de otimização combinatória conhecido por **Problema do Recobrimento**, que é um tipo particular de problema de programação linear inteira. De uma forma geral, problemas de coleta e entrega, roteamento e localização, retornam na forma de um problema de recobrimento, pois existe a necessidade de que cada cliente seja servido por pelo menos um serviço ou servidor (HOFFMAN; PADBERG, 2009).

Os trabalhos relacionados se utilizam de técnicas de otimização combinatória para a solução deste tipo de problema. Deve-se chamar a atenção ao fato de que as soluções encontradas são possíveis soluções ótimas, dada a complexidade da natureza do problema. A proposta de uma rede otimizada consiste em minimizar o número de nós da rede instalados — no caso apresentado, de sistemas centralizadores de medição, garantindo que toda área geográfica escolhida para a instalação esteja plenamente coberta.

Chvatal (1979) publicou o primeiro trabalho usando aproximações com algoritmos para solução do problema do recobrimento. Seu trabalho sugeriu uma heurística “gulosa”, do termo em inglês “*greedy*”, na busca pela melhor aproximação do ótimo.

Grossmann e Wool (1997) conduziram um estudo comparativo de diversas técnicas de algoritmos de busca para a solução do problema do recobrimento, incluindo algoritmos gulosos, relaxações, algoritmos aleatórios e exatos, e redes neurais artificiais. Em seu estudo, simulado em diversos problemas escolhidos aleatoriamente, concluíram que algoritmos gulosos de busca aleatória conduziam a boas soluções. A utilização de redes neurais artificiais não conduziram a soluções tão boas, mas esta última atingiu os critérios de parada em menor tempo. Concluíram, então, que quando o tempo para apresentação da solução for crucial, as redes neurais artificiais retornaram resultados mais significativos.

Reis (2007) estudou um algoritmo *branch and bound* para alocação de monitores de qualidade de energia elétrica em redes de transmissão e define seu modelo como sendo um clássico problema do recobrimento. O objetivo do trabalho é determinar a alocação ótima de medidores de qualidade de energia elétrica em uma rede de fornecimento de potência. Para a determinação do número ótimo, apresenta uma técnica de programação linear inteira 0–1, com resultados fortemente dependentes da topologia da rede em análise. Ele descreve a alocação ótima de medidores de qualidade de energia elétrica como a minimização do custo de instalação dos medidores, dado pela soma do custo de instalação para cada um. Sua proposta se utiliza de um algoritmo exato para busca de todas as soluções ótimas, mas de elevado tempo computacional.

Em um trabalho mais recente, Reis e Silva (2010) fizeram uma adaptação heurística em seu algoritmo para possibilitar que sua pesquisa varra espaços de busca maiores do mesmo problema citado em Reis (2007), aceitando soluções não ótimas, mas que satisfaçam condições e critérios de otimização. Para esta solução, os autores apresentam a utilização de um algoritmo

denominado *Heurística de Fixação*, um método semelhante ao utilizado por algoritmos *Branch and Bound*. Usa-se, a cada iteração do algoritmo, a fixação das variáveis em 0 e 1. Em seguida, avalia-se se o problema gerado possui solução dentro do limite dado pelo valor do problema original. Eles concluem que, para sistemas de pequeno porte, as heurísticas encontram resultados exatos em tempo computacional eficiente. Para sistemas maiores e mais complexos, encontram valores subótimos, próximos aos valores limitantes inferiores, garantindo a localização na vizinhança do ótimo.

Barreto (2011) faz um estudo sobre a recomposição de redes de telecomunicações utilizando metaheurísticas baseadas em algoritmos genéticos e algoritmo de Dijkstra (PAPADIMITRIOU; STEIGLITZ, 1998), utilizando ainda o conceito de redes fictícias para solucionar o problema de recomposição de redes de telecomunicações, aplicado ao problema do planejamento de redes de telecomunicações referente às redes de transporte. Em seu trabalho, ele sugere a utilização de um algoritmo do “caminho mais curto”, ou *shortest path* como estratégia para composição e planejamento de redes de telecomunicações.

A utilização do algoritmo de Dijkstra foi aplicado por ser uma solução na busca do caminho mais curto em grafos. Nesta estratégia, cada nó é explorado e associado a um custo. Sempre o nó de menor custo total até o momento é selecionado para continuar a exploração. O objetivo da obtenção do caminho mais curto é a capacidade de medir o comprimento do caminho através da aplicação de métricas como distâncias geográficas, custos operacionais, prioridades, entre outros.

Ainda no campo de projetos de redes de telecomunicações, Livramento (2004) apresentou um algoritmo genético para apoio a projetos de redes de telecomunicações cabeadas. A autora propôs o particionamento de grandes áreas em pequenas seções controladas por um único equipamento. Utiliza conceitos de grafos de vizinhança para a instalação de equipamentos de serviços de telecomunicações geograficamente referenciados em postes públicos.

Seu algoritmo, testado com dados reais em plantas de telecomunicações de grandes áreas urbanas, obteve bons desempenhos, distribuindo uniformemente os equipamentos conforme as demandas e minimizando custos estimados de materiais de construção aplicados às redes de telefonia cabeada na região teste.

Um algoritmo GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) é sugerido por Arroyo e Marques (2006) para resolver um problema de alocação de antenas de transmissão, que tem por objetivo cobrir a maior quantidade de pontos de demanda usando um número mínimo de antenas. Os autores tratam o tema como um problema de localização de máxima cobertura, sendo os recursos justamente modelados como antenas de transmissão e recepção. O objetivo é maximizar o número de clientes atendidos, minimizando o número de antenas a serem usadas.

Um interessante estudo realizado por Motta (2010) ataca o Problema do Recobrimento por Rotas Generalizado, onde os vértices podem ou não fazer parte da solução, através de grafos associados. Em sua tese, cita exemplos de problemas que podem ser associados à modelagem deste problema, tais como planejamento de rotas de patrulhamento, planejamento de rotas de

transporte público, entre outros, que podem ser reduzidos ao conhecido Problema do Caixeiro Viajante. Em seu trabalho, apresenta abordagens com heurísticas de construção, heurísticas de busca local e uma variação VNS (*Variable Neighborhood Search*).

Chen, Chen e Zhang (2010) apresentaram um algoritmo de otimização baseado na têmpera simulada para investigar a solução do problema de programação de tripulação durante operações irregulares em companhias aéreas. A abordagem proposta pelos autores na busca de soluções foi a formulação utilizando uma programação 0–1 para um problema de recobrimento. O objetivo principal na busca da solução deste problema é redistribuir tripulações para a cobertura de voos, com mínimo custo operacional, mantendo o máximo possível de tarefas em suas distribuições para cada equipe selecionada. O algoritmo proposto é dividido em dois passos:

- Selecionar um conjunto de tripulações candidatas: determina o número de pares afetados, o número de voos afetados e a dimensão do problema. A dimensão deve ser a menor possível para permitir a solução em tempo computacional aceitável, mas grande o suficiente para garantir boas soluções; e
- Gerar os pares de tripulação personalizados: com a finalidade de minimizar o distúrbio entre tripulações candidatas.

A estratégia por eles adotada para a formação das vizinhanças é:

1. Escolher aleatoriamente uma tripulação e seus pares;
2. Escolher aleatoriamente uma tripulação par escolhida pelos pares candidatos que cobrem a maioria dos voos não cobertos;
3. Escolher um voo que não está coberto e aleatoriamente escolher um par que cobrirá este voo; e
4. Escolher um voo que não está coberto e aleatoriamente escolher uma nova tripulação até que todos os voos estejam tripulados, garantindo que a todos os voos pelo menos uma tripulação esteja atribuída.

Comparando a metaheurística apresentada com resultados de testes obtidos com programação em ambiente CPLEX, eles conduziram a busca a resultados satisfatórios, concluindo que é realmente possível obter boas soluções para problemas de recobrimento utilizando este tipo de estratégia.

O trabalho apresentado por Chiu e Lin (2004) consiste na implementação de um algoritmo de otimização, também baseado em têmpera simulada, para solucionar um problema de otimização de alocação de sensores sem fios com limitação de custos de alocação e máxima cobertura. Adotaram um cenário baseado em rede que permite a instalação de no máximo um sensor em

cada ponto da rede. Cada sensor é limitado por um raio de cobertura conhecido e deve alcançar, no mínimo, o raio de cobertura definido por outro sensor para que a rede se forme. Neste trabalho definiram a distância Euclidiana como entrada do problema.

No início da busca, eles sugerem que exista um sensor implantado em cada ponto da rede. Cada iteração do algoritmo de otimização tenta reduzir um sensor ou modificar a localização de um sensor da rede de forma aleatória, e aceita a solução se as restrições forem satisfeitas. O algoritmo é interrompido se a temperatura mínima for atingida e se a cobertura completa é alcançada. Puderam concluir a eficiência do algoritmo comparando problemas menores de soluções conhecidas com algoritmos exatos. Concluíram que seu algoritmo pode produzir soluções desejadas para as redes, no entanto não é certo que a solução apresentada seja ótima.

Alrashed, Marimuthu e Habib (2010) apresentaram uma otimização para implantação de sensores e atuadores sem fios na rede elétrica (*wireless sensor-actor network*) também baseada no algoritmo têmpera simulada. O problema foca na localização de atuadores elétricos em uma rede de sensores-atuadores, visando encontrar os melhores pontos da rede para alocação dos equipamentos, de forma a minimizar a intervenção humana na ocorrência de algum evento, com restrições de custo e performance do sistema.

Para a geração das vizinhanças no espaço de busca, eles utilizaram quatro técnicas diferentes de geração aleatória de soluções:

1. um operador *Swap*, que altera a posição de dois atuadores selecionados aleatoriamente;
2. um operador *Add*, com a função de adicionar um novo atuador (selecionado de uma biblioteca de atuadores) em uma posição aleatória vazia;
3. um operador *Delete*, com objetivo de selecionar aleatoriamente um atuador e o retira da rede; e
4. um operador *Cost*, que avalia o desempenho da iteração e retorna o resultado ao algoritmo, aceitando esta nova configuração com base na probabilidade de aceitação do algoritmo de otimização.

A principal conclusão e contribuição do trabalho apresentado foi a codificação para automação da escolha dos locais de instalação de sensores e atuadores na rede elétrica. A simulação alcançou bons resultados de otimização no quesito abrangência da rede e custo do sistema, garantindo uma cobertura mínima da rede de 80% com um número ótimo de atuadores, reduzindo a função custo para instalação dos equipamentos.

O trabalho proposto aborda um problema de formação de redes de comunicação para dispositivos de medição e tarifação de energia elétrica. Os estudos dos textos citados acima servem de base para a formulação de técnicas que serão utilizadas na busca de soluções do problema formulado, fazendo uso de algumas abordagens defendidas nos trabalhos analisados.

O projeto apresentado por Reis (2007), por exemplo, ataca um problema de alocação de recursos para a instalação de monitores de qualidade de energia, utilizando, em seguida, uma

adaptação heurística na busca de melhores soluções (REIS; SILVA, 2010), aceitando soluções não ótimas, mas de reduzido custo computacional.

### 3.1 Contribuição dos Trabalhos Correlatos para a Técnica Proposta

Para a implementação proposta neste trabalho, a publicação de Barreto (2011) sugeriu a representação da rede por grafos e matrizes de adjacências. Estas técnicas são amplamente utilizadas neste trabalho para a implementação computacional proposta.

Livramento (2004) contribui com a idéia de formação de grafos de vizinhança para a instalação de equipamentos de serviços de telecomunicações em postes públicos, distribuindo-os geograficamente de forma uniforme na rede pública.

A formulação do Problema do Recobrimento, sugerida por Motta (2010), contribui para a modelagem do problema, associado a diversos problemas sugeridos em seu trabalho.

A técnica metaheurística *simulated annealing*, apresentada no trabalho de Chen, Chen e Zhang (2010), contribui para a formulação da busca de soluções do Problema do Recobrimento com programação 0–1. Este trabalho, em conjunto com o texto apresentado por Chiu e Lin (2004), que se utiliza da mesma idéia metaheurística para a alocação de sensores sem fios na rede elétrica, se diferencia pela adição do planejamento de garantia de máxima cobertura. Ambos contribuem para a idéia de otimização proposta, bem como o endereço inicial de busca, sugerindo que a busca por melhores resultados se inicie com um equipamento instalado em cada ponto da rede.

A técnica apresentada por Alrashed, Marimuthu e Habib (2010) sugere a idéia de minimização da intervenção humana no caso de falhas da rede de sensores proposta. A idéia utilizada para este trabalho é a de minimização de perdas de dados de faturamento, no caso de falha de um dos equipamentos da rede de comunicações entre medidores ou conjunto de medição.

Os trabalhos que se utilizaram de técnicas metaheurísticas na busca de soluções de seus problemas propostos, em especial os que se utilizaram da técnica de otimização *simulated annealing*, também contribuíram com técnicas para a formulação estruturas das vizinhanças, configuradas na modelagem computacional pela busca de soluções do problema aqui proposto.



## 4 METODOLOGIA

Este capítulo tem a finalidade de apresentar a modelagem matemática do problema, as estratégias adotadas na busca pela solução e a arquitetura proposta para o sistema computacional.

### 4.1 Modelagem Matemática do Problema

#### 4.1.1 Função Objetivo

A **Função Objetivo** obedece as regras do **Problema do Recobrimento** (equação (2.10)), reescrita aqui por questão de conveniência (equação (4.1)):

$$\text{Minimizar: } z = \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i, \quad (4.1)$$

onde  $c_i$  é o custo de instalação associado a cada conjunto de medição centralizado e  $x_i$  é a existência de instalação do ponto de medição centralizado, definida na equação (2.7) e reescrita na equação (4.2):

$$x_i = \begin{cases} 1; & \text{se o conjunto de medição centralizado está instalado; ou} \\ 0; & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.2)$$

Para as duas equações apresentadas acima, o índice  $i$  representa o ponto apto a receber um sistema de medição centralizado.

#### 4.1.2 Restrições

Baseado no Problema do Recobrimento, para a formação das **restrições**, inicialmente é necessário a obtenção da matriz densidade, que é uma representação por matriz de adjacências das conexões da rede de comunicações formada pelos conjuntos de medição centralizados. A matriz densidade, é definida na equação (2.11). A título de exemplo, supondo a rede formada por caixas de conjunto de medição centralizados instaladas e modeladas por um grafo conforme a figura 23, sua representação na matriz de adjacências será (equação (4.3)):

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} & d_{45} \\ d_{51} & d_{52} & d_{53} & d_{54} & d_{55} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

A partir das adjacências, é necessário garantir que todos os sistemas de medição centralizados possuam pelo menos uma adjacência, garantindo a cobertura da rede. Esta restrição

foi modelada na equação (2.13) e modificada aqui para garantia do atendimento à restrição de que uma caixa de medição deve manter comunicação com pelo menos um outro equipamento, representada pela matriz de adjacências (equação (4.4)):

$$u_i = \sum_{j=1}^n d_{ij} \cdot x_j \geq 2 \quad j = 0; 1; \dots; n, \quad (4.4)$$

onde os índices  $i$  e  $j$  representam os pontos aptos a receber sistemas de medição centralizados.

Esta restrição assegura que cada sistema de medição centralizado esteja conectado a pelo menos um dos outros sistemas, formando a rede de comunicações composta pelo conjunto destes equipamentos interligados.

As restrições específicas para a busca da melhor solução para a construção de uma rede AMI tornam o problema mais complexo. A primeira restrição que deve ser atendida é que nenhum cliente da área de cobertura deve ficar sem receber o serviço de medição. Todos os clientes devem receber um medidor de consumo de energia elétrica (equação (4.5)):

$$M_k = \begin{cases} 1; & \text{se recebeu a aplicação (medidor);} \\ 0; & \text{caso contrário;} \end{cases}, \quad (4.5)$$

onde  $M$  representa o recebimento ou não do medidor de consumo (aplicação) pelo cliente da rede de distribuição de energia elétrica e o índice  $k$  representa a identidade do cliente.

A caixa contendo os medidores do sistema de medição centralizado é capaz de atender até 12 clientes. Adicionalmente, o conjunto deve ser otimizado para utilizar a máxima capacidade permitida. Porém, existe a possibilidade de instalação de mais de uma caixa em cada ponto apto a receber os sistemas de medição centralizados. Esta restrição é modelada na equação (4.6):

$$Q_i \leq 12 \cdot N. \quad (4.6)$$

Para a equação (4.6),  $Q$  representa a quantidade de clientes instalados em um ponto apto a receber sistemas de medição centralizados, representados pelo índice  $i$ . A variável  $N$  representa o máximo de sistemas de medição centralizados que podem ser instalados no ponto  $i$ .

Um outro dado importante é que o conjunto de medição centralizado tem distância máxima definida até a aplicação, em virtude da ligação dos ramais alimentadores de energia elétrica. O comprimento máximo admitido para os ramais de ligação são expressos em metros. Assumindo esta restrição como a distância euclidiana, define-se a restrição na equação (4.7):

$$\beta_{ki} \leq L, \quad (4.7)$$

onde o índice  $i$  representa o ponto com o sistema de medição centralizado instalado, o índice  $k$  a identidade do cliente,  $\beta$  a distância entre o sistema e o cliente, e  $L$  a distância euclidiana máxima aceitável entre um sistema de medição centralizado  $i$  até um cliente  $k$ .

É sabido, também, que os rádios que formarão a infraestrutura de comunicações e estarão

dispostos na rede *Mesh* tem potência definida e alcance limitado (em metros), tornando-se uma restrição. Para o caso desta restrição, não está sendo levado em conta a presença de obstáculos — como construções e relevo. Por este motivo, o limitante será uma distância máxima configurável entre sistemas de medição centralizados. Esta restrição é modelada como distância euclidiana e é dada pela equação (4.8):

$$\alpha_{ij} \leq P, \quad (4.8)$$

onde, na equação (4.8), os índices  $i$  e  $j$  representam os pontos aptos a receberem um sistema de medição centralizado,  $\alpha$  é a distância entre os sistemas, e  $P$  a distância euclidiana máxima aceitável entre sistemas de medição centralizados.

Por último, uma relação de custo de instalação em locais com algum tipo de impeditivo por elementos de construção da própria rede, tais como transformadores, estais, emendas, ou outros quaisquer. O custo de instalação de cada equipamento na rede será assumido como 1 unidade monetária. No caso de algum impeditivo existente na rede, a heurística permitirá a instalação desde que sejam realizadas as manobras pertinentes na rede de distribuição de energia. Para este caso, assume-se um custo diferenciado para o cálculo da função objetivo, expresso na equação (4.9):

$$c_i = \begin{cases} 1; & \text{se não existir necessidade de manobra na rede; e} \\ W_i; & \text{caso exista necessidade de manobra na rede.} \end{cases} \quad (4.9)$$

Nesta última restrição (equação (4.9)),  $c$  representa o custo associado a cada instalação de um sistema de medição centralizado em um ponto apto a receber a instalação  $i$ , e  $W$ , o custo associado a esta instalação, em unidades monetárias, no caso de existir algum impeditivo ou necessidade de manobra (mudança de ponto de um transformador, retirada de estais, troca de cabos ou isoladores, entre outras).

#### 4.1.3 Apresentação da Modelagem Matemática

Conhecidas a **Função Objetivo**, a restrição para o **Problema do Recobrimento** e as restrições para a formulação da **Infraestrutura Avançada de Medição**, o problema de otimização combinatória se apresenta com a seguinte modelagem:

$$\text{Minimizar: } z = \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i \quad \begin{array}{l} i = 0; 1; \dots; n \\ c = 1; 2; \dots \end{array} ; \quad (4.10)$$

$$x = \{0; 1\}$$

$$\text{Sujeito a: } u_i = \sum_{i=1}^n d_{ij} \cdot x_i \geq 2 \quad \begin{array}{l} i; j = 0, 1, \dots; n \\ x = \{0; 1\} \end{array} , \quad (4.11)$$

$$M_k = 1 \quad k = 0; 1; \dots; n, \quad (4.12)$$

$$Q_i \leq 12 \cdot N \quad \begin{array}{l} i = 0; 1; \dots; n \\ N = \{0; 1; \dots\} \end{array} , \quad (4.13)$$

$$\beta_{ki} \leq L \quad \begin{array}{l} i; k = 0; 1; \dots; n \\ L \in \mathbf{R}_+^* \end{array} , \quad (4.14)$$

$$\alpha_{ij} \leq P \quad \begin{array}{l} i; j = 0; 1; \dots; n \\ P \in \mathbf{R}_+^* \end{array} . \quad (4.15)$$

Para estas equações, os índices  $i$  e  $j$  representam os pontos aptos a receberem pelo menos um sistema de medição centralizado. O índice  $k$  representa a identidade de um cliente.

A variável  $c$  representa o custo associado à instalação de um elemento da rede e  $x$  a instalação efetivada ou não.

O vetor  $u$  é o resultado do somatório de uma linha da matriz de adjacências de instalação dos sistemas de medição centralizados.

$M$  representa o atendimento a um cliente  $k$ .

A variável  $Q$  indica a quantidade de clientes conectados a um ponto apto a receber pelo menos um sistema de medição centralizado.  $N$  identifica o número de caixas de medição instaladas em um ponto apto a receber o sistema.

As variáveis  $\beta$  e  $\alpha$  representam as distâncias entre um cliente e um sistema de medição centralizado e entre sistemas de medição instalados, respectivamente.

## 4.2 Estratégia de Otimização

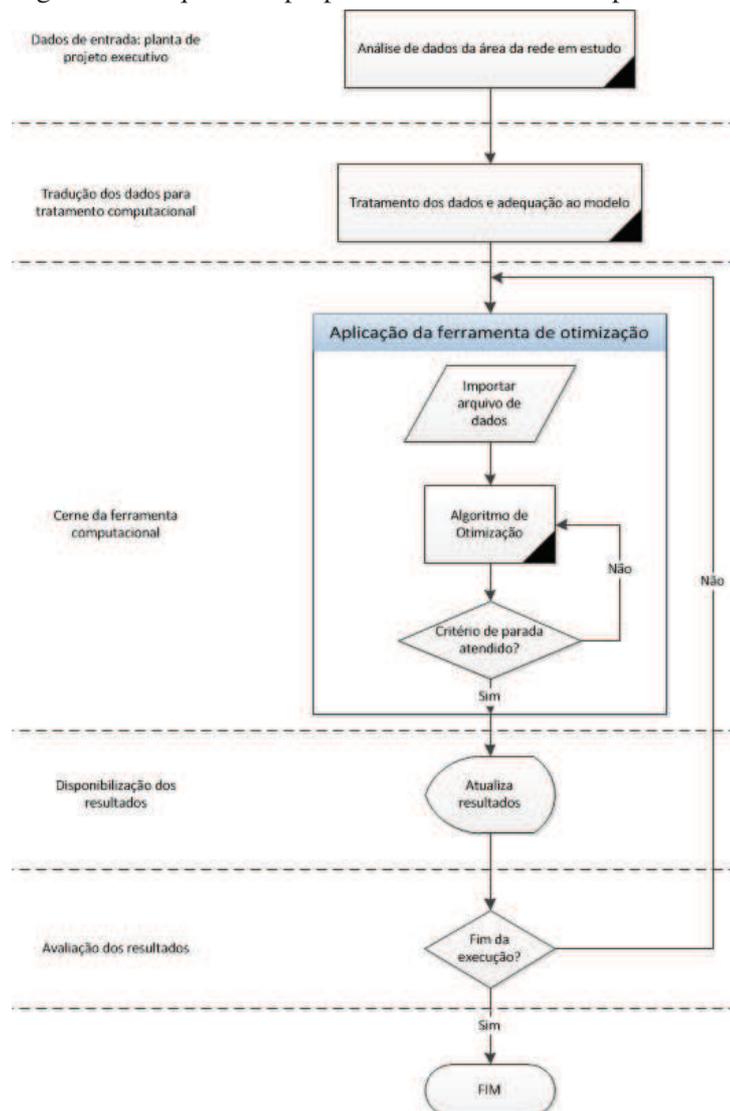
O algoritmo selecionado para a estratégia de otimização do problema é uma busca metaheurística que imita o processo de têmpera de materiais (ver seção 2.5.1) e é considerado um método altamente confiável na solução de difíceis problemas de otimização (CHIU; LIN, 2004). Este algoritmo realiza buscas em trajetória com base em estruturas de vizinhança. Na metaheurística **têmpera simulada**, as vizinhanças são formadas por movimentos aleatórios das soluções candidatas baseadas na solução atual. A cada iteração, cada vizinhança retorna um conjunto de soluções que é avaliado pelo algoritmo principal. O algoritmo principal é executado diversas vezes em cada patamar de temperatura e seleciona o melhor resultado encontrado no patamar corrente para compará-lo à solução atual.

Diversas estratégias podem ser definidas na formação das estruturas de vizinhança e normalmente as escolhas dependem da natureza do problema e da criatividade do executor do projeto. As estratégias utilizadas neste trabalho fazem uso de mecanismos aleatórios na busca por melhores soluções.

Esta seção apresenta a codificação para implementação computacional do problema e dos mecanismos utilizados na busca.

A estratégia adotada neste trabalho para otimizar uma rede de infraestrutura avançada de medição, com arquitetura apresentada na figura 25, inicia com a geração de uma solução inicial factível, gerada aleatoriamente. Em seguida, o algoritmo de otimização trabalha na busca por melhores resultados que a solução inicialmente gerada e, a cada iteração, busca por um resultado melhor que o já encontrado. O algoritmo só para quando algum critério de parada esteja plenamente satisfeito.

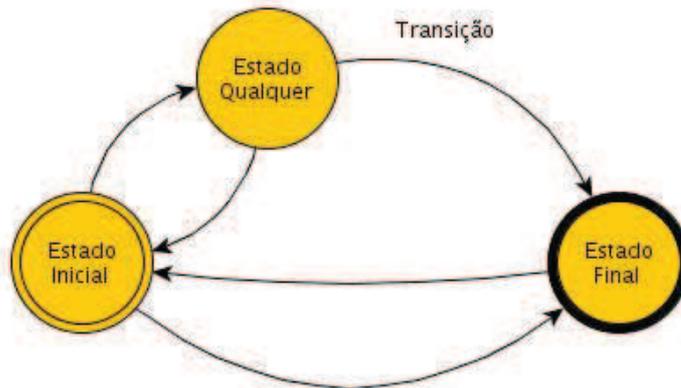
Figura 25: Arquitetura proposta da ferramenta computacional.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A ferramenta computacional desenvolvida é dividida em camadas, onde cada camada representa um autômato finito determinístico. Cada camada pode ser identificada como um “estado do sistema”, responsável por resolver um pequeno problema a cada iteração. Os estados do sistema têm algumas distinções, como estado de início, estado qualquer, estado final, além de uma regra de transição, como ilustra a figura 26

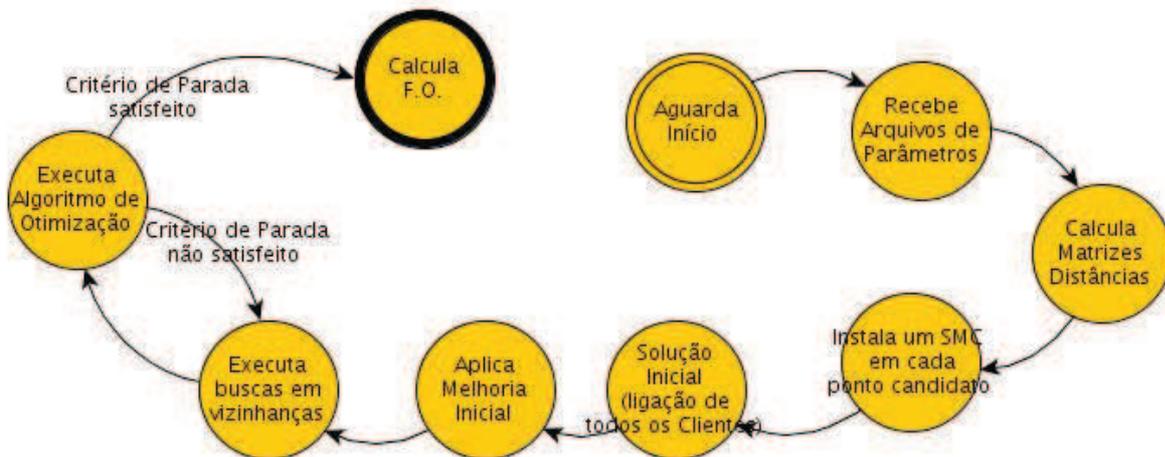
Figura 26: Representação gráfica dos estados de um autômato.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O cerne da ferramenta computacional está subdividida em estados distintos (figura 27).

Figura 27: Autômato representando o cerne da ferramenta proposta.



Fonte: Elaborada pelo autor.

1. **Aguarda Início:** este estado interage com o usuário, aguardando a configuração de vários parâmetros do sistema, como arquivos de entrada, distâncias limites (variáveis  $\beta$  e  $\alpha$ ), máximo de clientes suportado em um ponto candidato (variável  $N$ ) e as temperaturas inicial e final do algoritmo de temperatura simulada, além de um comando para início do processo de busca;

2. **Recebe Arquivos de Parâmetros:** como o nome indica, este estado recebe os arquivos de parâmetros derivados da análise do projeto executivo da rede de distribuição de energia elétrica:
  - (a) Arquivo de Pontos SMC: contendo a localização de todos os pontos aptos a receberem sistemas de medição centralizados, referenciados em um plano cartesiano, além do custo associado à instalação (variável  $c$ ), presença ou ausência de instalação (variável  $x$ ), taxa de ocupação (variável  $Q$ ) e custo total de instalação no ponto  $i$  (resultante de  $c \cdot N$ )
  - (b) Arquivo de Pontos CLI: contendo a localização de todos os pontos clientes, referenciados em um plano cartesiano, o atendimento ou não da aplicação de medição (variável  $M$ ) e o ponto de instalação  $i$  em que o cliente  $k$  está associado;
3. **Calcula Matrizes Distâncias:** este estado cria duas matrizes, que representam as distâncias entre todos os sistemas de medição centralizados (distâncias  $\alpha_{i,j}$ ) e entre todos os clientes e todos os sistemas de medição centralizados (distâncias  $\beta_{k,i}$ );
4. **Instala um SMC em cada ponto candidato:** inicia uma solução inicial factível, alocando um sistema de medição centralizado a cada ponto apto a receber o sistema;
5. **Solução Inicial:** realiza o atendimento a todos os clientes, tornando a solução inicial factível, retira os sistemas de medição com alocação  $Q_i = 0$  e calcula a Função Objetivo;
6. **Aplica melhoria inicial:** aplicação de uma melhoria inicial, com finalidade de iniciar a busca metaheurística de um resultado já melhorado por uma estratégia de melhoria;
7. **Executa buscas em vizinhanças:** aplica algoritmos de busca em vizinhança, na busca por soluções;
8. **Executa o algoritmo de otimização:** avalia as respostas encontradas pelas buscas em vizinhança, os critérios de aceitação das soluções e os critérios de parada, devolvendo os resultados conforme as leis de formação do problema e de solução do algoritmo.

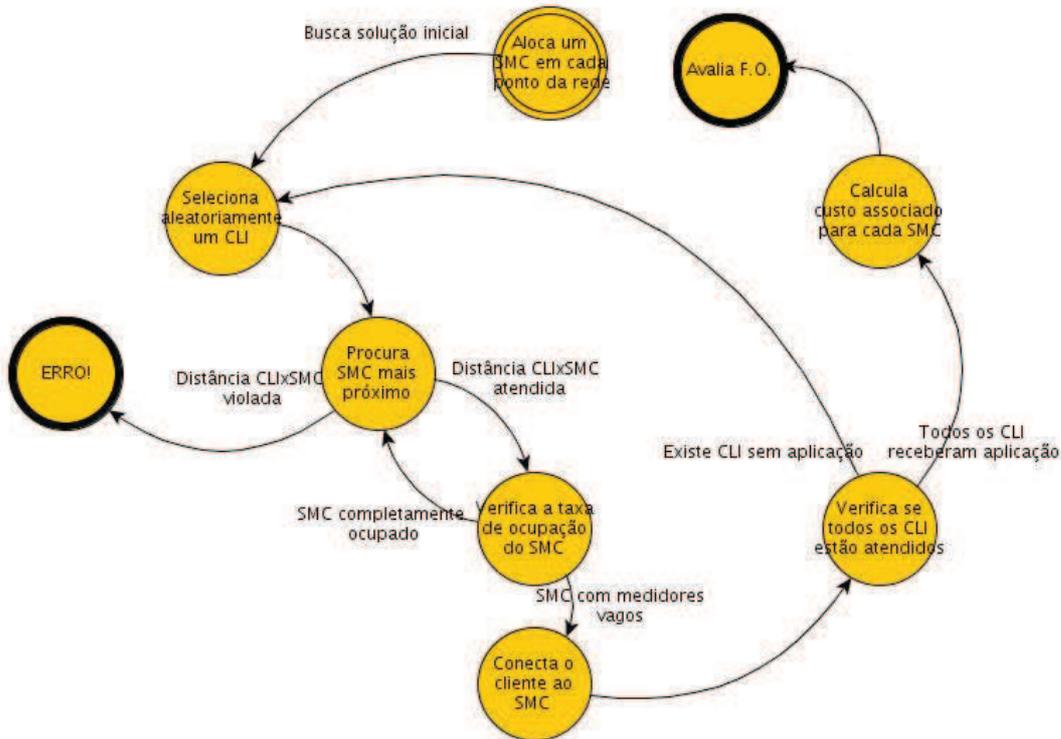
Por sua vez, cada estado do cerne do sistema é formado por um pequeno autômato finito determinístico, descritos detalhadamente nas seções que seguem.

#### 4.2.1 Solução Inicial Factível

A solução inicial é representada pelo autômato finito determinístico da figura 28.

Seus estados representam as etapas de formação do resultado, novamente resolvendo problemas menores a cada iteração:

Figura 28: Autômato representando a aplicação da solução inicial factível.



Fonte: Elaborada pelo autor.

1. **Aloca um SMC em cada ponto da rede:** como a própria nomenclatura do estado indica, a ferramenta computacional inicia alocando um sistema de medição centralizado em cada ponto  $i$  candidato da rede de distribuição de energia elétrica, independente do custo de instalação associado  $c_i$ . Cada ponto  $i$  representa um poste da rede de distribuição e pode ser dotado de outros dispositivos de rede de comunicações ou de distribuição de energia elétrica, alterando individualmente os custos de instalação para cada ponto candidato;
2. **Seleciona aleatoriamente um cliente:** com base em uma distribuição uniforme de probabilidade, seleciona aleatoriamente um cliente  $k$  da rede de distribuição de energia elétrica;
3. **Procura SMC mais próximo:** varre a matriz de distâncias entre clientes e sistemas de medição na busca do SMC mais próximo e verifica se o critério de distância máxima ( $\beta_{ki} < L$ ) é respeitado. Se algum cliente não puder receber a aplicação em função da violação desta condição, a ferramenta emite um aviso para que este cliente seja desconsiderado na busca pela otimização;
4. **Verifica taxa de ocupação do SMC:** verifica a condição de ocupação máxima ( $Q_i \leq 12 \cdot N$ ) do sistema de medição centralizado alocado ao ponto  $i$  localizado. Se o sistema alocado neste ponto estiver completamente ocupado, retorna ao estado 3;

5. **Conecta o cliente ao SMC:** faz a associação do cliente  $k$  ao ponto de instalação de um sistema de medição centralizado  $i$ ;
6. **Verifica se todos os clientes estão atendidos:** varre a matriz **Pontos CLI**, derivada do arquivo de configuração de mesmo nome, em busca de clientes que ainda não estão associados a um sistema de medição centralizado. No caso de ainda haver clientes sem associação, retorna ao estado 3;
7. **Calcula custo associado para cada SMC:** calcula o custo associado de instalação,  $c_i$ , para cada ponto  $i$  da rede, incluído pontos que não contém sistemas de medição centralizados associados, retornando 0 (zero) para estes casos;
8. **Avalia a F.O.:** calcula o custo total de implementação do sistema  $z$ , através da equação (4.1).

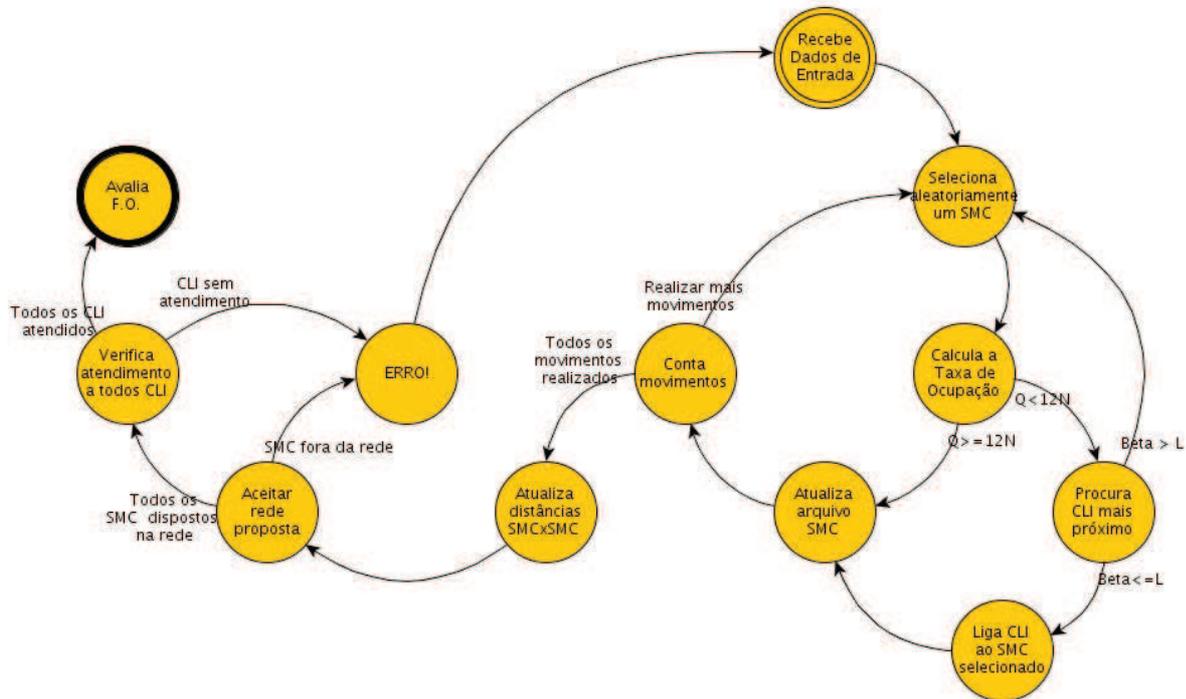
#### 4.2.2 Melhoria Inicial

Como o nome do estado sugere, a melhoria inicial é um estado do sistema que aplica uma estratégia de melhora do resultado obtido pela solução inicial factível. Seus estados são representados na figura (29).

O objetivo da aplicação desta melhoria é selecionar sistemas de medição centralizados, aleatoriamente, e completar sua ocupação com clientes mais próximos, eliminando equipamentos instalados pela solução inicial.

1. **Recebe dados de entrada:** recebe o resultado da solução inicial factível;
2. **Seleciona aleatoriamente um SMC:** seleciona aleatoriamente um ponto  $i$ , dotado de pelo menos um sistema de medição centralizado ( $x_i = 1$ );
3. **Calcula a taxa de ocupação:** verifica se o sistema de medição centralizado selecionado está completamente ocupado ou se ainda pode receber a associação com algum cliente;
4. **Procura cliente mais próximo:** se o sistema de medição centralizado permitir associação ( $Q < 12 \cdot N$ ), este estado busca o cliente mais próximo e o associa ao ponto  $i$  com  $x_i = 1$  sorteado. Caso a caixa de medição esteja lotada, retorna ao estado 2;
5. **Liga CLI ao SMC selecionado:** associa o cliente mais próximo ao sistema de medição selecionado no estado 2;
6. **Atualiza arquivo SMC:** atualiza o arquivo de Pontos SMC com a nova configuração de associação;
7. **Conta número de movimentos:** verifica se todos os movimentos configurados para a melhoria inicial foram executados;

Figura 29: Autômato representando a aplicação da melhoria inicial.



Fonte: Elaborada pelo autor.

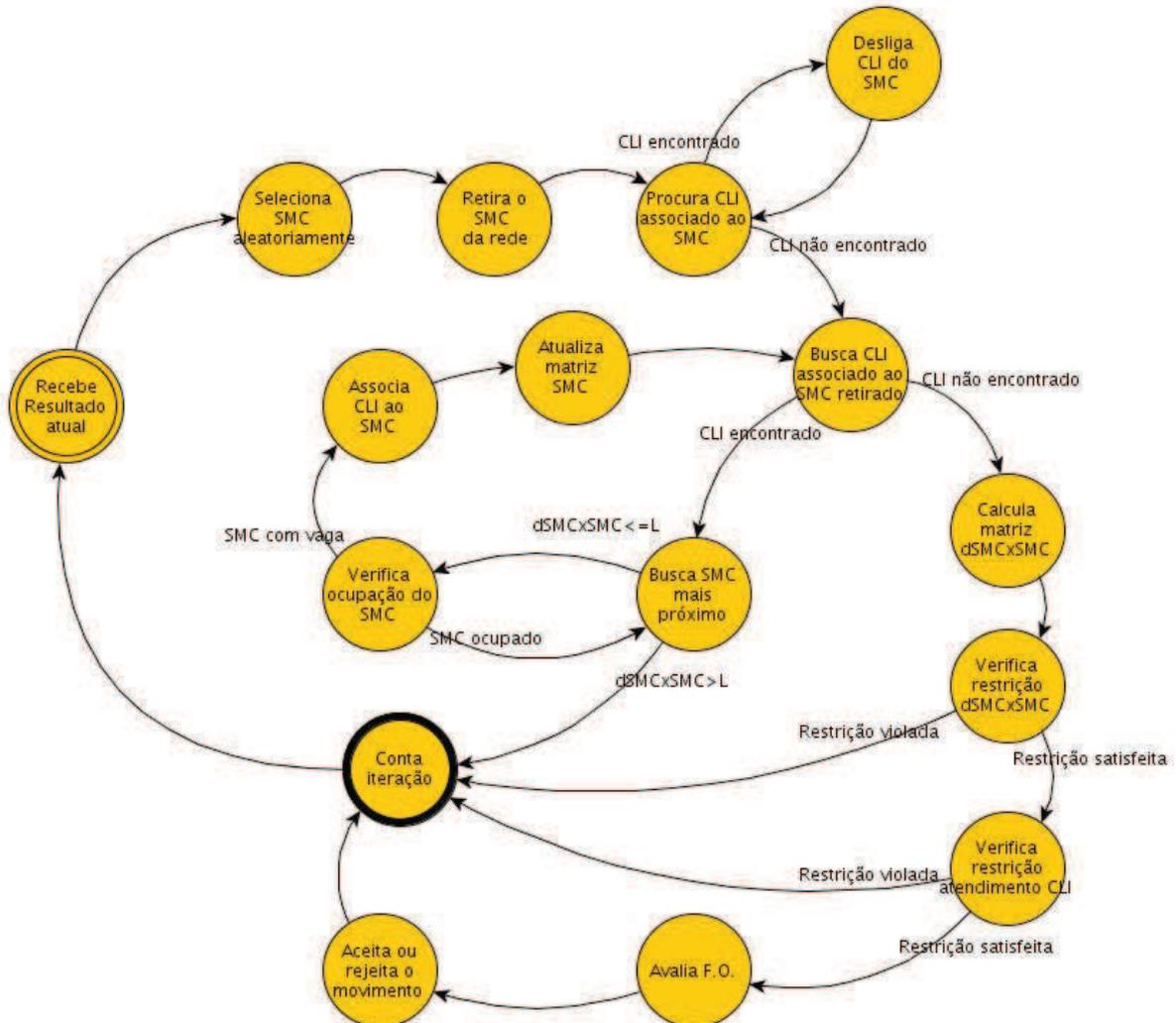
8. **Atualiza distâncias SMC×SMC:** calcula as distâncias entre caixas de medição instaladas, desprezando pontos  $i$  que não receberam equipamentos ( $x_i = 0$ );
9. **Aceitar a rede proposta:** verifica se todos as caixas de medição possuem no mínimo uma adjacência que não viole a condição de restrição da equação (4.8);
10. **Verifica atendimento a todos CLI:** varre o arquivo Pontos CLI na busca de um cliente que não está atendido, violando a função de restrição da equação (4.5);
11. **Avalia F.O.:** avalia a nova Função Objetivo, calculada pela equação (4.1).

#### 4.2.3 Geração de Vizinhanças: Estratégia 1 – Retira um SMC do sistema e realoca os clientes ao SMC mais próximo

A primeira estratégia adotada para a geração das soluções de vizinhança baseia-se no trabalho apresentado por Chiu e Lin (2004). Com a sugestão inicial de que todos os pontos disponíveis deverão receber um sistema de medição centralizado, a cada iteração será escolhido aleatoriamente um ponto  $i$ , com  $x_i = 1$ , e o equipamento será retirado. Em seguida, os clientes ligados ao sistema retirado serão realocados às caixas existentes mais próximas (figura 30).

No caso de algum cliente ficar sem receber a aplicação, os movimentos são descartados, todas as posições retornam à configuração original e um sorteio de um novo ponto é realizado. Repete-se, então, uma nova busca em vizinhança.

Figura 30: Autômato representando a geração de soluções da busca em vizinhança da estratégia 1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A geração de resultados trabalha ligada a um contador de iterações, de forma que seja possível configurar a quantidade de soluções que a vizinhança poderá gerar a cada iteração do algoritmo de otimização proposto.

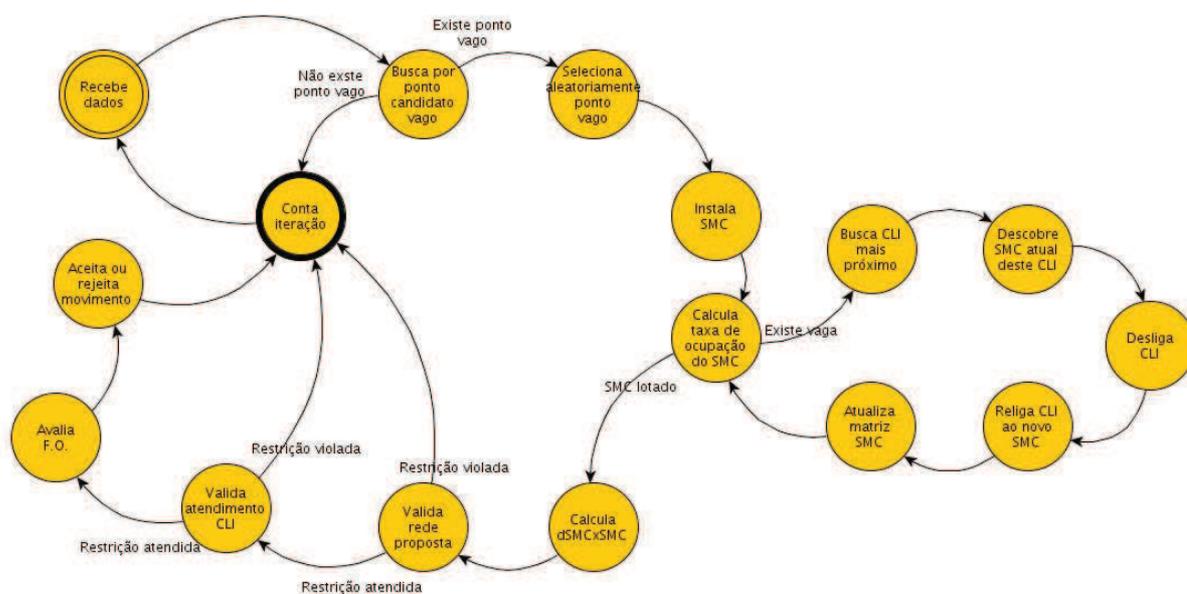
1. **Recebe estado atual:** recebe a configuração atual (após qualquer iteração de melhoria) da rede de comunicação formada pelos sistemas de medição centralizados;
2. **Seleciona SMC aleatoriamente:** seleciona aleatoriamente, com base em uma distribuição uniforme de probabilidades, um sistema de medição centralizado existente na rede ( $i \mid x_i = 1$ );
3. **Retira o SMC da rede:** retira o sistema de medição centralizado selecionado da rede, tornando  $x_i = 0$ ;

4. **Procura CLI associado ao SMC:** procura um cliente associado ( $k$ ) ao sistema de medição centralizado retirado anteriormente. Se encontrar o cliente, executa o passo 5. Caso contrário, executa o passo 6;
  5. **Desliga CLI do SMC:** retorna  $M_k = 0$  e retorna ao passo refProcura CLI associado ao SMC;
  6. **Busca CLI associado ao SMC retirado:** varre o arquivo Pontos CLI na busca de um cliente desligado ( $M_k = 0$ ) e associado ao equipamento retirado no estado 3. Se nenhum cliente for encontrado, executa o estado 11;
  7. **Busca SMC mais próximo:** com base nas distâncias  $\alpha_{ij}$ , procura o sistema mais próximo ( $x_i = 1$ ). Se a restrição de distâncias entre clientes e sistemas de medição centralizados for violada, conta a iteração e reinicia a busca nesta vizinhança;
  8. **Verifica a ocupação do SMC:** este estado verifica a restrição de ocupação do ponto  $i$ , baseado na restrição de ocupação ( $Q_i \leq 12 \cdot N$ ). Se o ponto estiver completamente ocupado, refaz a busca de um sistema de medição centralizado mais próximo (estado 7);
  9. **Associa CLI ao SMC:** associa o cliente à caixa de medição mais próxima com vagas disponíveis e retorna o cliente como aplicação instalada ( $M_k = 1$ );
  10. **Atualiza matriz SMC:** atualiza a matriz Pontos SMC, baseada no arquivo de mesmo nome e retorna ao estado 6;
  11. **Calcula matriz dSMC $\times$ SMC:** calcula a matriz de distâncias entre pontos da rede de comunicações, com  $x_i = 1$ , baseado nas distâncias  $\alpha_{ij}$ ;
  12. **Verifica restrição dSMC $\times$ SMC:** se algum sistema de medição centralizado estiver indisponível à rede de comunicações, violando a restrição  $\alpha_{ij} \leq P$ , conta a iteração e reinicia a busca nesta vizinhança;
  13. **Verifica a restrição de atendimento CLI:** conta a iteração e reinicia a busca nesta vizinhança, no caso da violação da restrição de atendimento a clientes ( $M_k = 0$ );
  14. **Avalia F.O.:** avalia o custo resultante da rede proposta;
  15. **Aceita ou rejeita movimento:** compara o resultado encontrado (custo de instalação) com o resultado atual, aceitando ou rejeitando como nova solução.
- 4.2.4 Geração de Vizinhanças: Estratégia 2 – Insere um SMC na rede e liga os clientes mais próximos

Esta estratégia baseia-se no trabalho proposto por Alrashed, Marimuthu e Habib (2010), onde o algoritmo procura um ponto da rede vago e apto a receber um sistema de medição

centralizado e insere um equipamento. A partir daí, ele completa a ligação buscando os clientes mais próximos até que a distância até o cliente mais próximo seja maior que a permitida para a instalação. Esta otimização tem o objetivo de agrupar o máximo possível de clientes distantes e direcioná-los a utilização de um único sistema de medição (figura 31).

Figura 31: Autômato representando a geração de soluções da busca em vizinhança da estratégia 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim como a situação anterior, esta busca trabalha com um contador de iteração, avaliando múltiplas soluções a cada iteração do algoritmo principal de otimização.

1. **Recebe dados:** recebe a configuração atual (após qualquer iteração de melhoria) da rede de comunicação formada pelos sistemas de medição centralizados;
2. **Busca por ponto candidato vago:** procura por um ponto  $i$ , com a condição  $x_i = 0$ ;
3. **Seleciona aleatoriamente ponto vago:** com base em uma distribuição uniforme de probabilidades, seleciona aleatoriamente um ponto candidato a receber um sistema de medição centralizado;
4. **Instala um SMC:** retorna  $x_i = 1$  para o ponto  $i$  selecionado, na matriz de Pontos SMC;
5. **Calcula taxa de ocupação do SMC:** verifica se, no ponto instalado, existe vaga para adição de clientes. Caso o sistema esteja lotado, executa o estado 11;
6. **Busca CLI mais próximo:** procura, na rede instalada, o cliente  $k$  mais próximo ao novo equipamento disponibilizado na rede;
7. **Descobre SMC atual deste CLI:** verifica à que caixa  $i$  o cliente selecionado está associado;

8. **Desliga CLI:** desliga o cliente selecionado e retorna  $M_k = 0$ ;
9. **Religa CLI ao novo SMC:** associa o cliente  $k$  ao novo equipamento  $i$  e retorna  $M_k = 1$ ;
10. **Atualiza matriz SMC:** atualiza a matriz Pontos SMC, base do arquivo de mesmo nome, e retorna ao estado 5;
11. **Calcula dSMCxSMC:** calcula a matriz distâncias entre sistemas de medição centralizados instalados, com base nas distâncias  $\alpha_{ij}$ ;
12. **Valida rede proposta:** verifica se a restrição  $\alpha_{ij} \leq P$  foi violada. Se sim, recusa os movimentos realizados, conta uma iteração e reinicia a busca a partir do estado inicial;
13. **Valida atendimento CLI:** verifica o atendimento da restrição de atendimento a clientes ( $M_k = 1$ ). Se a restrição foi violada, recusa os movimentos realizados, conta uma iteração e reinicia a busca a partir do estado inicial;
14. **Avalia F.O.:** calcula o custo total da rede proposta, considerando a Função Objetivo proposta;
15. **Aceita ou rejeita movimento:** avalia o resultado atual com o melhor resultado encontrado pela vizinhança, aceitando ou rejeitando como nova solução proposta, com base no menor custo de instalação.

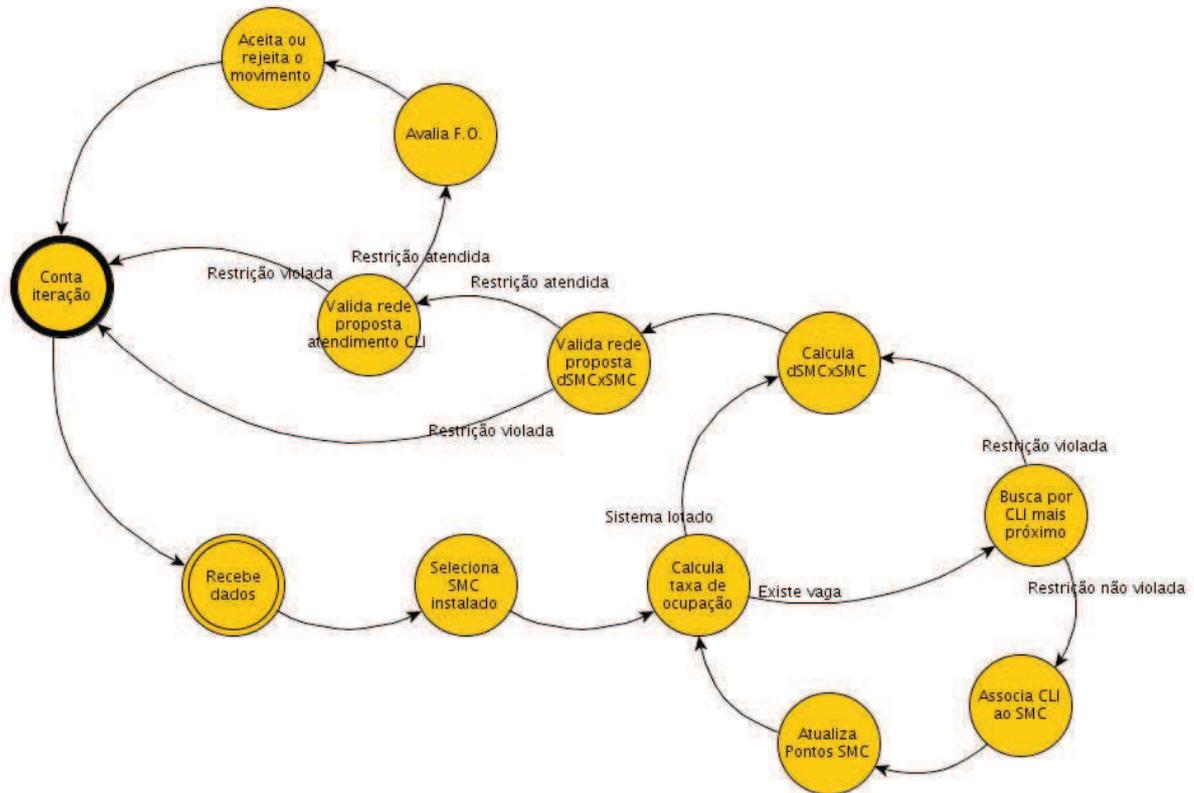
#### 4.2.5 Geração de Vizinhanças: Estratégia 3 – Maximização das taxas de ocupação das caixas de medição

Esta estratégia assemelha-se a anterior, mas tem objetivo de maximizar o uso das caixas de medição ocupando todos os medidores disponíveis. O algoritmo procura aleatoriamente um ponto da rede e verifica se existe um sistema de medição centralizado instalado. Se existir um sistema de medição centralizado, verifica os clientes mais próximos e liga-os à este ponto, na tentativa de agrupar clientes próximos em um único sistema de medição centralizado, com altas taxas de ocupação (figura 32).

Esta busca também é guiada por um contador de iterações, avaliando múltiplas soluções a cada iteração do algoritmo principal de otimização.

1. **Recebe dados:** recebe a configuração atual (após qualquer iteração de melhoria) da rede de comunicação formada pelos sistemas de medição centralizados;
2. **Seleciona SMC instalado:** seleciona, aleatoriamente e com base em uma distribuição uniforme de probabilidades, um ponto de instalação  $i$  com um sistema de medição centralizado instalado ( $x_i = 1$ );

Figura 32: Autômato representando a geração de soluções da busca em vizinhança da estratégia 3.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3. **Calcula taxa de ocupação:** verifica se, no ponto instalado, existe vaga para adição de clientes. Caso o sistema esteja lotado, executa o estado 7;
4. **Busca por CLI mais próximo:** procura o cliente  $k$  mais próximo do ponto  $i$  selecionado e verifica a condição de restrição  $\alpha_{ij} \leq P$ . Se a restrição não for violada, executa o estado 5. Caso ocorra violação, encerra a busca executando o estado 7;
5. **Associa CLI ao SMC:** associa o cliente  $k$  ao sistema de medição centralizado selecionado;
6. **Atualiza Pontos SMC:** atualiza a matriz Pontos SMC, baseada no arquivo de entrada;
7. **Calcula dSMC×SMC:** calcula a matriz distâncias entre sistemas de medição centralizados instalados, com base nas distâncias  $\alpha_{ij}$ ;
8. **Valida rede proposta dSMC×SMC:** verifica se a restrição  $\alpha_{ij} \leq P$  foi violada. Se sim, recusa os movimentos realizados, conta uma iteração e reinicia a busca a partir do estado inicial;
9. **Valida rede proposta atendimento CLI:** verifica o atendimento da restrição de atendimento a clientes ( $M_k = 1$ ). Se a restrição foi violada, recusa os movimentos realizados,



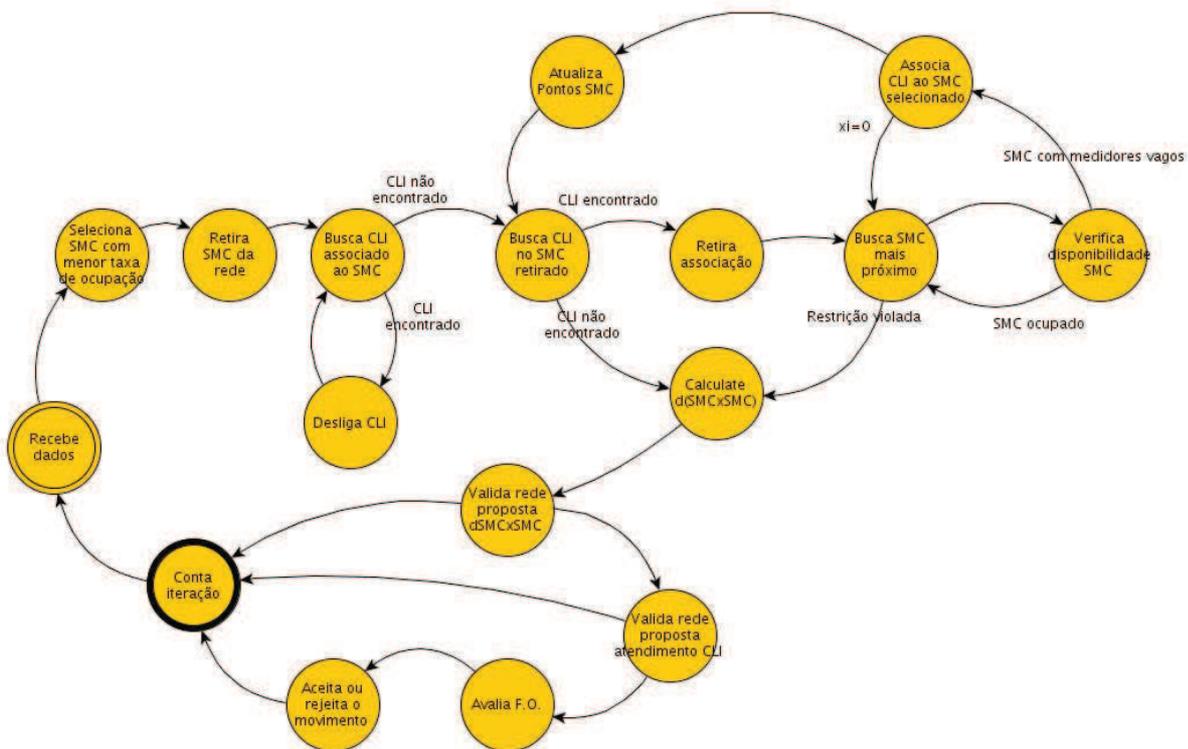
2. **Seleciona SMC mais custoso:** varre a matriz Pontos SMC, na busca do sistema de medição centralizado com maior custo de instalação associado ( $c_i$ );
3. **Retira o SMC da rede:** retira a caixa instalada no ponto  $i$  da rede, retornando  $x_i = 0$ ;
4. **Busca CLI habilitado:** varre a matriz Pontos CLI na busca de clientes  $k$  associados ao sistema de medição centralizado instalado no ponto  $i$ . Caso não existam clientes habilitados, salta para o estado 6;
5. **Desabilita CLI:** desliga o cliente  $k$  da rede, retornando  $M_k = 0$ ;
6. **Busca CLI no antigo SMC:** varre a matriz Pontos CLI na busca de clientes  $k$  associados à caixa de medição retirada da rede e sem atendimento;
7. **Retira associação:** desfaz a associação entre o cliente  $k$  e o servidor  $i$ ;
8. **Busca SMC mais próximo:** com base nas distâncias  $\alpha_{ij}$ , procura o sistema de medição centralizado  $i \mid x_i = 1$  mais próximo do cliente  $k$ ;
9. **Calcula taxa de ocupação SMC:** verifica se existe espaço vago na caixa de medição encontrada. Se a caixa estiver lotada, retorna a busca pelo estado 8;
10. **Associa CLI ao SMC mais próximo:** associa o cliente  $k$  ao sistema de medição centralizado mais próximo, com medidores vagos;
11. **Atualiza matriz SMC:** atualiza a matriz Pontos SMC, de acordo com a nova associação criada;
12. **Calcula dSMC×SMC:** calcula a matriz distâncias entre sistemas de medição centralizados instalados, com base nas distâncias  $\alpha_{ij}$ ;
13. **Valida rede proposta dSMC×SMC:** verifica se a restrição  $\alpha_{ij} \leq P$  foi violada. Se sim, recusa os movimentos realizados, conta uma iteração e reinicia a busca a partir do estado inicial;
14. **Valida rede proposta atendimento CLI:** verifica o atendimento da restrição de atendimento a clientes ( $M_k = 1$ ). Se a restrição foi violada, recusa os movimentos realizados, conta uma iteração e reinicia a busca a partir do estado inicial;
15. **Avalia F.O.:** calcula o custo total da rede proposta, considerando a Função Objetivo proposta;
16. **Aceita ou rejeita movimento:** avalia o resultado atual com o melhor resultado encontrado pela vizinhança, aceitando ou rejeitando como nova solução proposta, com base no menor custo de instalação encontrado.

#### 4.2.7 Geração de Vizinhanças: Estratégia 5 – Retira SMC com baixa taxa de ocupação

O objetivo desta estratégia de buscas em vizinhança é a retirada de sistemas de medição centralizados com baixa taxa de ocupação, transferindo os clientes atendidos para servidores mais próximos, reduzindo o número de equipamentos instalados e otimizando a ocupação das caixas de medição existentes na rede formada pelos dispositivos de medição centralizada.

A representação do autômato que implementa esta estratégia é ilustrada na figura 34.

Figura 34: Autômato representando a geração de soluções da busca em vizinhança da estratégia 5.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Também guiada por um contador de iterações, avalia múltiplas soluções a cada iteração do algoritmo principal de otimização.

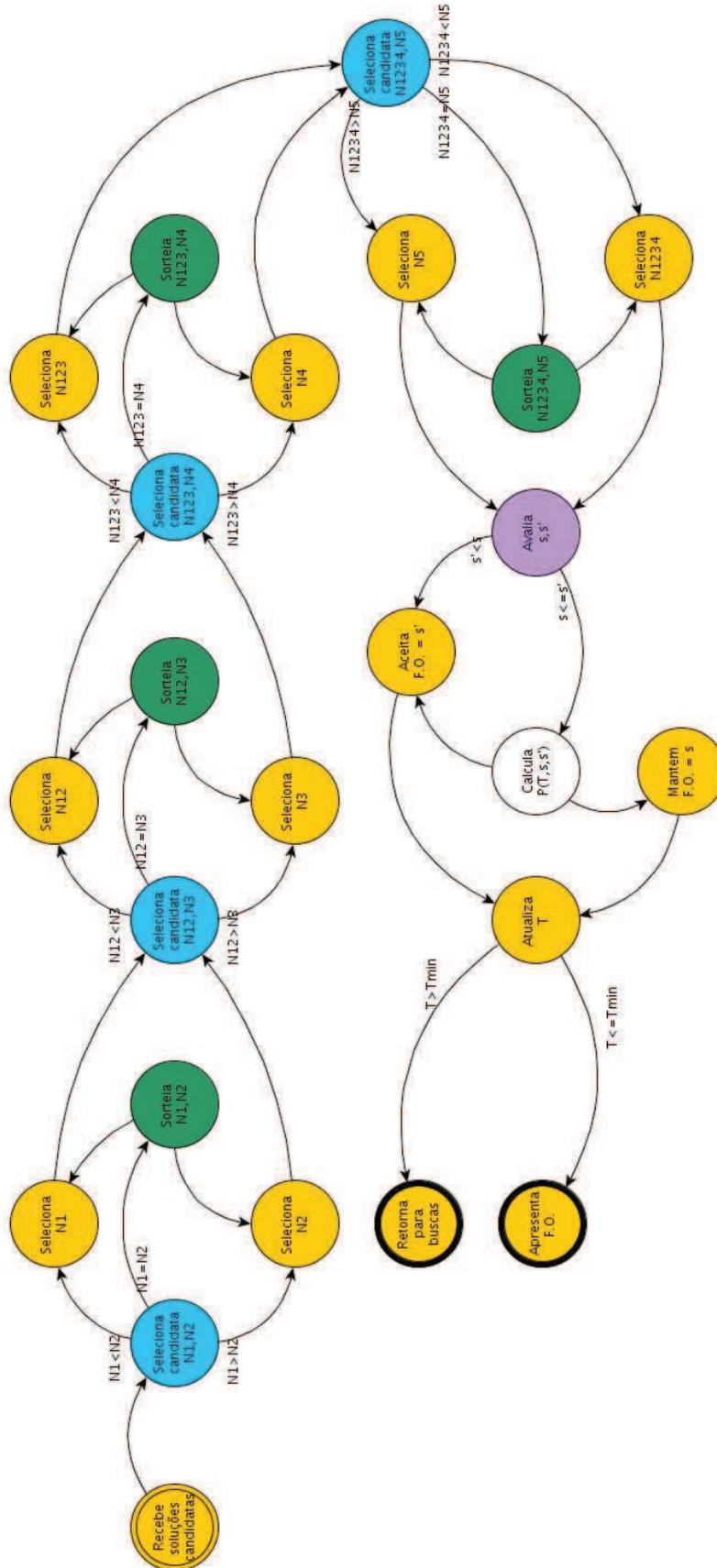
1. **Recebe dados:** recebe a configuração atual (após qualquer iteração de melhoria) da rede de comunicação formada pelos sistemas de medição centralizados;
2. **Seleciona SMC com menor taxa de ocupação:** seleciona um sistema de medição centralizado da rede com menor taxa de ocupação, baseado na matriz Pontos SMC recebida;
3. **Retira SMC da rede:** retira o sistema de medição centralizado selecionado da rede;
4. **Busca CLI associado ao SMC:** varre a matriz Pontos CLI na busca de clientes que estão associados à caixa de medição retirada. Se encontrado um cliente, executa o estado 5;

5. **Desliga CLI:** retira a associação do cliente  $k$  com o sistema de medição  $i$ , selecionado no estado 2, retornando  $M_k = 0$ ;
6. **Busca CLI no SMC retirado:** varre a matriz Pontos CLI, na busca de clientes associados ao sistema de medição centralizado retirado da rede. Se não houver mais clientes associados a este endereço, inicia a avaliação da rede proposta pelo estado 12;
7. **Retira Associação:** desfaz a associação do cliente  $k$  com o sistema  $i$  retirado;
8. **Busca SMC mais próximo:** com base nas distâncias  $\alpha_{ij}$ , procura o sistema  $i$  mais próximo do cliente  $k$  desligado. Se a restrição for violada, encerra a busca nesta iteração;
9. **Verifica disponibilidade SMC:** verifica a taxa de ocupação do sistema de medição centralizado selecionado. Se a caixa estiver ocupada, retorna a busca por uma mais próxima, executando o estado 8;
10. **Associa CLI ao medidor selecionado:** se as restrições de distância entre cliente e sistema de medição,  $\beta_{ki}$ , e de taxa de ocupação ( $Q_i \leq 12 \cdot N$ ) forem satisfeitas, associa o cliente  $k$  ao sistema  $i$  encontrado na busca;
11. **Atualiza pontos SMC:** atualiza a matriz Pontos SMC, baseada no arquivo de entrada de mesmo nome e retorna a busca por clientes associados ao SMC retirado;
12. **Calculate dSMC×SMC:** calcula as distâncias  $\alpha_{ij}$  entre os sistemas de medição centralizada instalados;
13. **Valida rede proposta dSMC×SMC:** verifica se a condição de restrição  $\alpha_{ij} \leq P$  não foi violada para que a rede seja válida;
14. **Valida rede proposta atendimento CLI:** verifica o atendimento da restrição de atendimento a clientes ( $M_k = 1$ ). Se a restrição foi violada, recusa os movimentos realizados, conta uma iteração e reinicia a busca a partir do estado inicial;
15. **Avalia F.O.:** calcula o custo total da rede proposta, considerando a Função Objetivo proposta;
16. **Aceita ou rejeita movimento:** avalia o resultado atual com o melhor resultado encontrado pela vizinhança, aceitando ou rejeitando como nova solução proposta, com base no menor custo de instalação encontrado.

### 4.3 Algoritmo de Otimização *Simulated Annealing*

O algoritmo de otimização é executado após as estruturas de vizinhança retornarem seus resultados. Baseado no clássico algoritmo de otimização apresentado da seção 2.5.1, algoritmo 1, e representado por uma autômato finito determinístico, como mostra a figura 35.

Figura 35: Autômato representando o algoritmo de otimização *Simulated Annealing*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Este algoritmo é largamente utilizado em problemas de otimização, realizando buscas por ótimos globais através de uma estratégia de busca em trajetória, avaliando resultados obtidos através de buscas por formação de vizinhanças. Para evitar que a busca pela otimização fique “presa” em ótimos locais, estratégias de “fuga” destes pontos são empregadas, com finalidade de diversificação na procura de diferentes ótimos locais no espaço de buscas.

Inicialmente, cada vizinhança executa um determinado número de buscas, recebendo a solução atual do algoritmo principal várias vezes, guardando o melhor resultado para utilização posterior, na disputa entre as respostas obtidas por todas as vizinhanças. Após todas as vizinhanças terminarem suas buscas e retornarem os melhores resultados, o algoritmo de otimização executa a seleção da melhor resposta para que esta seja comparada com a resposta atual da busca principal.

Esta execução é realizada várias vezes para um mesmo patamar de temperatura, com o objetivo de intensificar as buscas no patamar corrente.

Os estados de seleção das soluções candidatas, gerados pelas vizinhanças, são destacados na cor azul, no diagrama de estados. A seleção de resultados busca sempre pela melhor função objetivo candidata (aquela de menor custo). No caso de haver duas vizinhanças com mesmo valor de custo candidato, um sorteio entre estes resultados seleciona a vizinhança que concorrerá ao próximo estado de comparação, até que todas as vizinhanças tenham passado pela seleção.

O estado representado na cor violeta retorna a comparação direta entre a vizinhança “vencedora” e a função objetivo atual. Este estado decide se aceita a nova configuração proposta ou se aceita com base em uma função de probabilidades (estratégia de diversificação).

#### 4.3.1 Estratégias de Diversificação

A principal estratégia de diversificação usada no sistema proposto, é a aceitação, com base na comparação entre a melhor Função Objetivo encontrada com a solução proposta pelas vizinhanças. Aceita-se uma solução pior com base no critério de probabilidades baseada na temperatura atual do resfriamento controlado.

O estado **Calcula P(T,s,s')** representa esta estratégia no diagrama de estados representado pela figura 35.

Porém, se o resultado da função objetivo for o mesmo, a função de avaliação também aceita este resultado na comparação, pois a Função Objetivo avalia custos e não a arquitetura da rede. Neste caso, um mesmo resultado da função custo pode apresentar diferentes arquiteturas de rede. Ao aceitar uma arquitetura diferenciada, o resultado das iterações das funções de vizinhança podem se alterar, fungindo de armadilhas “locais”.

Outra forma de diversificação proposta, é a comparação direta entre os resultados gerados pelas funções de vizinhança. Se duas vizinhanças retornam o mesmo resultado de candidato como objetivo (função custo), elas “concorrem” em um sorteio, com base em uma distribuição uniforme de probabilidades, de forma que as redes formadas pelos sistemas de medição

centralizados apresentem variações de topologia.

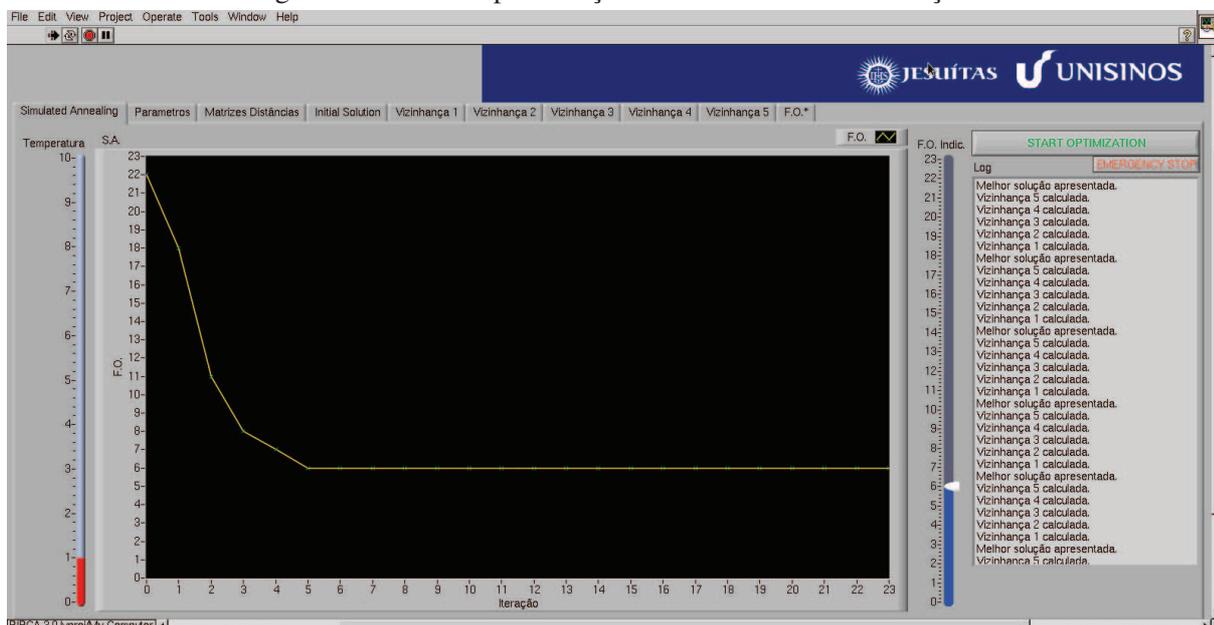
Os estados que representam estes sorteios, denominados **Sorteia  $N_a, N_b$** , onde  $a$  e  $b$  representam as funções de vizinhança, estão marcados na cor verde no diagrama representando o autômato finito.

#### 4.4 Apresentação da Ferramenta de Otimização

A ferramenta proposta é apresentada como um programa de computador executável, na forma gráfica, permitindo interações com o usuário. As interações permitidas são a escolha dos arquivos que contém os endereços e características dos pontos aptos a receberem um sistema de medição centralizado, pontos endereçando clientes, e demais configurações, como distâncias máximas permitidas e temperaturas inicial e final.

A tela principal, apresentada na figura 36, apresenta uma janela onde, em tempo real, é possível acompanhar o processo de otimização na forma de um gráfico que representa o resultado selecionado pelo algoritmo de otimização. Além disso, é possível acompanhar a evolução da temperatura e o valor absoluto da função objetivo.

Figura 36: Tela de apresentação da ferramenta de otimização.



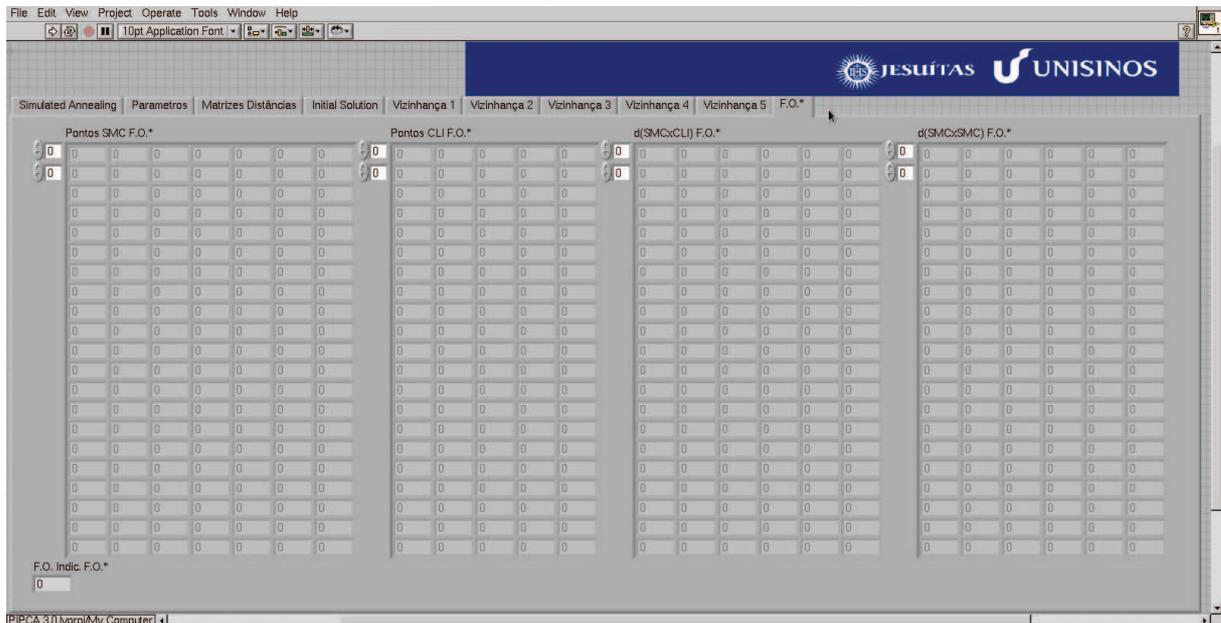
Fonte: Elaborada pelo autor.

Um indicador lateral também permite o acompanhamento do estado em que o algoritmo se encontra.

Esta apresentação, composta por “abas”, permite acompanhar também a manipulação das matrizes e as buscas pelas funções de vizinhanças e as redes formadas em cada vizinhança, bem como a rede resultante, expressa na função objetivo, em tempo real (figura 37).

Na **aba de configurações**, figura 38 é possível selecionar alguns parâmetros que serão usa-

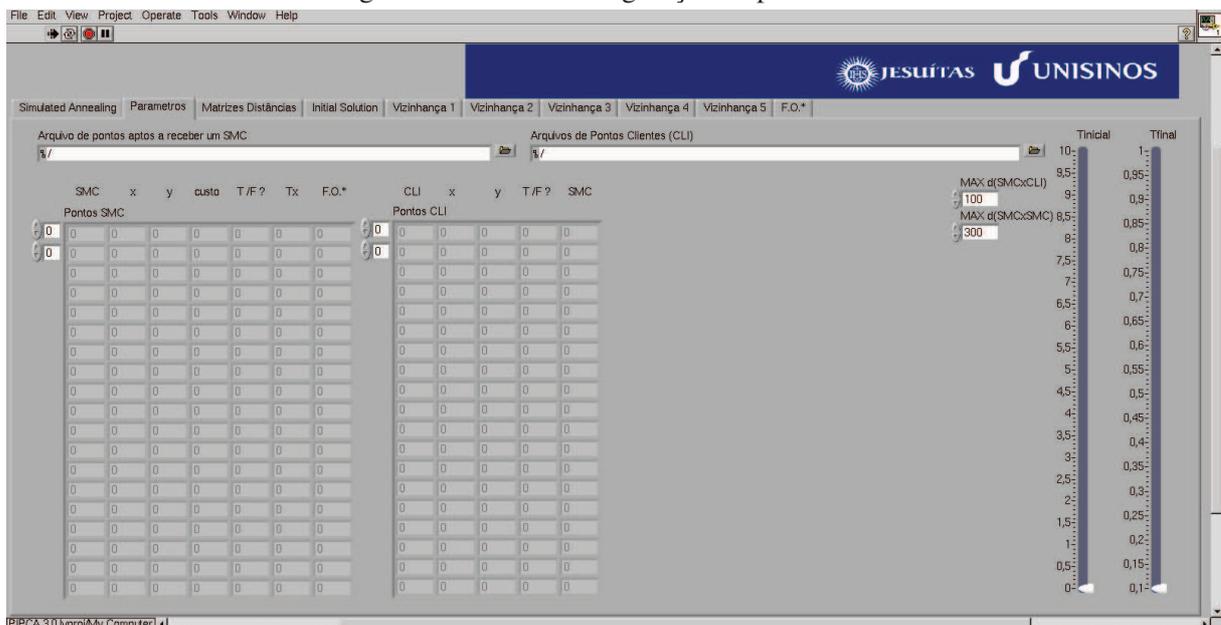
Figura 37: Tela de apresentação da Função Objetivo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

dos na busca pela formação da rede de comunicações de sistemas de medição centralizados, tal como temperaturas inicial e final (que determinam os números de iterações do algoritmo), máximas distâncias permitidas entre caixas de medição e entre caixas e clientes, e seleção dos arquivos de entrada. Não é possível alterar estes parâmetros em tempo de execução.

Figura 38: Aba de configuração de parâmetros.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A metodologia, desenvolvida para este trabalho, é apresentada na forma de um produto de *software* para apoio na tomada de decisões para projetos de rede de comunicações, formada por

sistemas de medição centralizados para distribuição e faturamento de energia elétrica.

As simulações podem ser realizadas sobre projetos de construção para novas redes de distribuição de energia elétrica, bem como em redes já existentes, pois é possível configurar o sistema prevendo a existência ou não de equipamentos instalados.

## 5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Este capítulo aborda uma série de experimentos realizados em problemas testes para verificação da implementação computacional da ferramenta de otimização proposta para a busca de soluções do problema em estudo.

Foram realizadas simulações em duas redes distintas, uma de menor porte, outra de porte maior, sobre plantas reais de distribuição de energia elétrica em uma localidade de área urbana e alta concentração demográfica.

O planejamento de redes aborda, inicialmente, a simulação de uma rede composta por 16 pontos aptos a receberem sistemas de medição centralizados, atendendo um total de 58 clientes.

Os resultados, apresentados graficamente na forma de sugestões de instalação dos equipamentos, serão comparados à rede real instalada como forma de validação dos dados encontrados no espaço de busca.

Nesta mesma rede, será apresentado um pequeno passo a passo de uma das respostas sugeridas, como forma de ilustrar o processo de otimização de resultados no espaço de busca selecionado.

Em uma outra simulação, apresentando uma rede de maior porte, envolvendo um número maior de clientes e de pontos aptos a receberem sistemas de medição centralizada, as simulações sofreram variações de parâmetros de calibração do algoritmo principal. Estas variações permitiram a comparação dos diferentes resultados obtidos, bem como seleção dos parâmetros que podem ser utilizados na busca, priorizando tempo, custo ou a formação de diferentes topologias de rede.

Estes resultados são mostrados na forma de evolução gráfica dos resultados encontrados para função custo e comparação entre os melhores resultados encontrados em cada uma das situações propostas.

### 5.1 Planejamento da Rede

Para melhor entendimento da metodologia proposta, é possível acompanhar um passo a passo do projeto de uma pequena rede de telecomunicações.

Inicialmente, é preciso planejar a rede a ser simulada, baseada na planta de um projeto executivo de redes de distribuição de energia elétrica. Também é importante a definição de parâmetros de simulação, tais como temperaturas inicial e final e distâncias máximas de alcance dos enlaces de rádio para comunicação entre os sistemas de medição centralizados que irão compor a rede de comunicações, bem como as distâncias permitidas entre os sistemas e os clientes que receberão a camada de aplicação.

Com os parâmetros definidos previamente, o algoritmo realiza as leituras dos dados fundamentais dos pontos candidatos a receberem sistemas de medição centralizados e da posição de clientes de acordo com um plano cartesiano de coordenadas. Feito isso, todas as distâncias

entre pontos candidatos são calculadas, além de todas as distâncias entre clientes e todos os pontos candidatos, preenchendo com os valores calculados as matrizes **Distâncias SMC** $\times$ **SMC** e **Distâncias CLI** $\times$ **SMC**. Os valores contidos nestas matrizes serão, posteriormente, usados na busca de soluções ótimas e avaliação de critério de aceitação das redes formadas pelo algoritmo de busca.

Os resultados definidos como solução ótima dependem diretamente dos parâmetros configurados na etapa anterior à realização da simulação, além da avaliação da função objetivo (equação (4.1)).

Outra característica da estratégia é o critério de parada da busca, definida como o atingimento da temperatura mínima de resfriamento, um dos parâmetros configuráveis.

## 5.2 Planejamento de uma Rede 16 Pontos Candidatos e 58 Clientes

Com a finalidade de execução de um problema teste, o planejamento de uma rede de pequeno porte será avaliada. Esta rede deve atender um total de 58 clientes, recomendando a instalação de sistemas de medição centralizados dispostos em 16 diferentes pontos candidatos. A avaliação da Função Objetivo busca minimizar custos de instalação. Logo, a busca será pelo menor número de equipamentos instalados, fugindo de pontos candidatos que apresentem a necessidade de manobras na rede de distribuição de energia elétrica.

O problema teste a ser avaliado é baseado na planta de um projeto executivo real e ilustrado na figura 39.

Os arquivos de entrada, Pontos SMC e Pontos CLI, representam as coordenadas cartesianas dos pontos candidatos e disposição dos clientes na planta. Além disso, podem ser configuradas a existência ou não de equipamentos já instalados na rede (caso previsto para uma expansão) e necessidades de manobras na rede (alterando-se o custo de instalação associado a cada ponto candidato). Os formatos de entrada destes arquivos estão representados pelas tabelas 1 e 2, respectivamente.

Com objetivo de avaliar a estratégia, as simulações consideraram temperaturas inicial em  $10^\circ$ , final em  $0,1^\circ$  (critério de parada), atribuindo diferentes custos de instalação associado, dependendo do tipo de equipamento instalado em cada ponto da rede de distribuição de energia elétrica. Outro parâmetro importante, a taxa de resfriamento utilizada, teve seu valor determinado em 0,9. Este parâmetro define o número de iterações do algoritmo principal, bem como a probabilidade de aceitação de soluções geradas pelos algoritmos de busca em vizinhança.

Neste conjunto de simulações, o limite de atendimento, considerando o número de clientes, para cada ponto candidato  $i$  está fixado em 24, ou seja, duas caixas de medição centralizada, no máximo, por ponto candidato.

A cada iteração, o algoritmo de otimização principal avalia 30 respostas de cada vizinhança, totalizando uma análise de 150 respostas por cada nível de temperatura (ou iteração).

Então, o conjunto de configurações dos parâmetros a serem utilizados para esta simulação



Tabela 2: Arquivo de entrada **Pontos CLI**.

Ponto $k$	coord. x	coord. y	$M_k$	SMC	Ponto $k$	coord. x	coord. y	$M_k$	SMC
0	186	140	0	0	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1	196	137	0	0	29	210	79	0	0
2	208	133	0	0	30	210	79	0	0
3	221	129	0	0	31	210	79	0	0
4	248	120	0	0	32	231	66	0	0
5	242	117	0	0	33	227	60	0	0
6	233	111	0	0	34	226	60	0	0
7	223	115	0	0	35	240	47	0	0
8	213	118	0	0	36	242	55	0	0
9	203	121	0	0	37	244	62	0	0
10	183	128	0	0	38	247	72	0	0
11	183	128	0	0	39	260	151	0	0
12	183	128	0	0	40	270	143	0	0
13	165	123	0	0	41	273	153	0	0
14	168	131	0	0	42	276	161	0	0
15	173	146	0	0	43	278	170	0	0
16	254	144	0	0	44	281	178	0	0
17	254	144	0	0	45	269	182	0	0
18	254	144	0	0	46	266	174	0	0
19	266	132	0	0	47	263	165	0	0
20	263	122	0	0	48	240	149	0	0
21	266	114	0	0	49	222	154	0	0
22	258	103	0	0	50	222	154	0	0
23	254	95	0	0	51	222	154	0	0
24	252	89	0	0	52	195	163	0	0
25	249	80	0	0	53	195	163	0	0
26	236	87	0	0	54	195	163	0	0
27	232	72	0	0	55	236	34	0	0
28	222	76	0	0	56	227	38	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	57	214	42	0	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

seguem as seguintes regras:

- Respostas por vizinhança avaliadas a cada iteração: 30;
- Temperatura inicial =  $10^\circ$ ;
- Temperatura final =  $0,1^\circ$ ;
- Taxa de resfriamento = 0,9;
- Máximo de atendimento por ponto candidato = 24;
- Distância máxima entre  $SMC \times CLI = 100$ ;

- Distância máxima entre  $SMC \times SMC = 300$ .

A tabela 3 apresenta o resultado das avaliações com o melhor valor encontrado, indicando a iteração que resultou este valor, bem como iterações onde houveram variações na topologia da rede, mas manteve-se o resultado da função custo. A tabela indica, ainda, o valor entregue ao algoritmo de otimização resultante da etapa de melhoria inicial. Os melhores resultados obtiveram como função custo o valor de 5 unidades monetárias como resultados da Função Objetivo.

Tabela 3: Valores ótimos obtidos nas simulações.

Indicador da Simulação	Iteração de Solução Ótima	Troca de Topologia	Melhoria Inicial
2	19	24 e 33	17
3	39	—	21
6	13	—	17
7	31	—	21
9	5	—	20
10	4	29	16
14	6	—	16
16	13	—	22
17	5	16	19
19	6	—	22
20	6	25	21
22	23	—	18
23	6	—	21
24	6	—	22
25	6	—	21
29	26	—	23

Fonte: Elaborada pelo autor.

A tabela 4 apresenta as estatísticas dos resultados encontrados para as 30 simulações da rede.

Tabela 4: Resultados médios para simulação de rede com 11 pontos candidatos e 58 clientes.

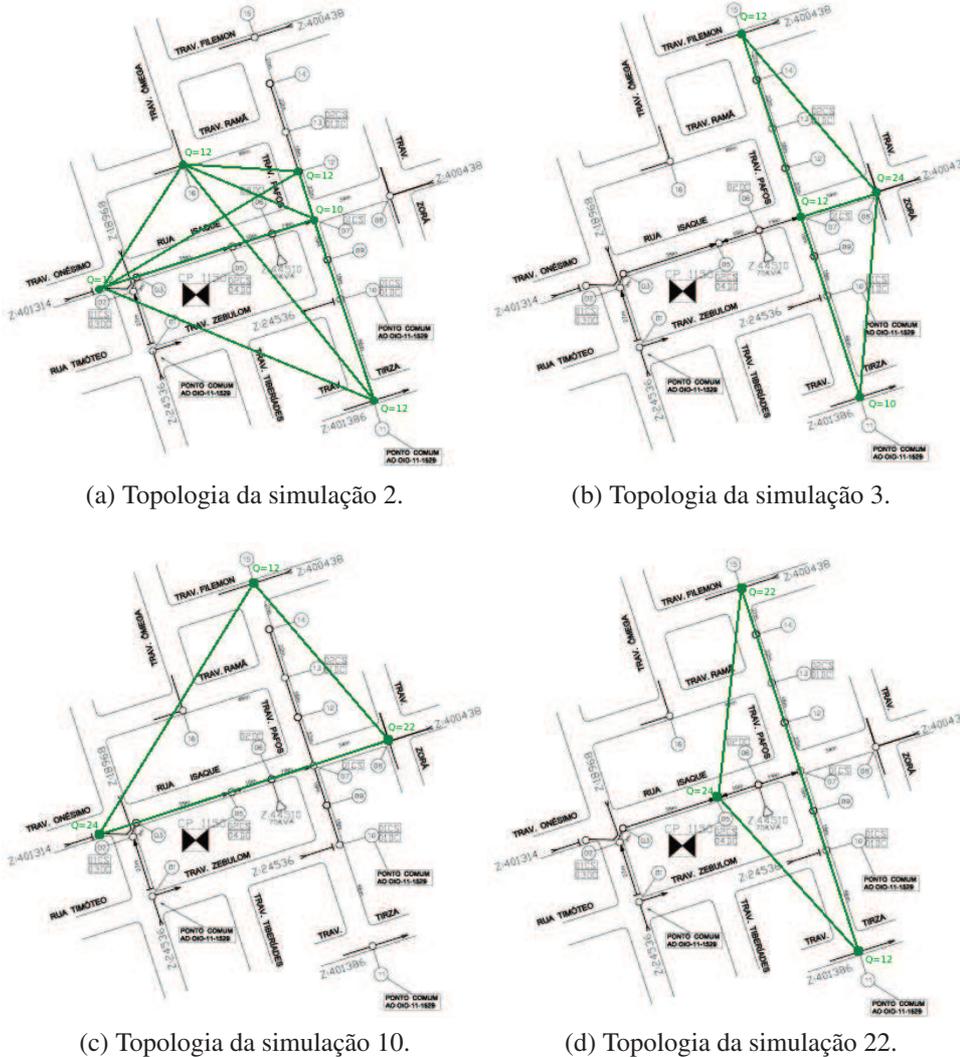
Iteração de Melhor Valor Médio	26
Valor Médio de Solução Ótima	5,5
Desvio Padrão de Solução Ótima	$\pm 0,5$

Em 16 simulações, das 30 realizadas, o algoritmo encontrou o menor resultado possível para o problema selecionado. Destes, em cinco oportunidades, o algoritmo foi capaz de alterar a topologia de rede, com objetivo de diversificação da busca pelo melhor resultado e agrupar os clientes em sistemas de medição centralizados, minimizando a instalação em diferentes pontos candidatos e aumentando as taxas de ocupação de cada caixa.

As demais simulações, conforme observado na tabela 4, que representa as estatísticas das simulações, ficaram com valores bastante próximos aos melhores encontrados.

No objetivo de ilustrar as topologias obtidas com a estratégia de otimização, a figura 40 representa graficamente as topologias de rede de comunicação formadas pelas soluções encontradas na tabela 3.

Figura 40: Exemplos de topologias sugeridas para o problema de 11 pontos candidatos e 58 clientes.



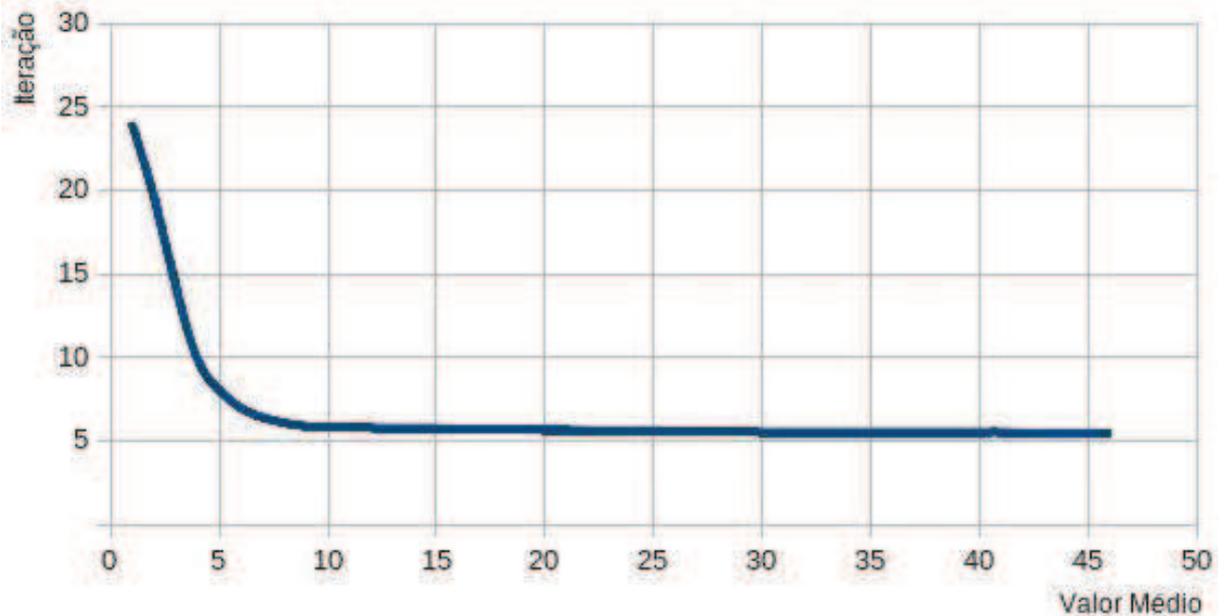
Fonte: Elaborada pelo autor.

As topologias apresentadas representam uma opção de resposta de instalação de equipamentos para formação da rede de comunicações entre os sistemas de medição centralizado. Para este caso, é possível perceber que a restrição de distâncias máximas entre as caixas de medição não é violada em nenhuma hipótese, dada a geografia do local destinado à formação da rede.

Cada simulação realizou a busca de forma diferenciada, evidenciada pelas respostas encontradas e caracterizadas pelo número de iterações necessárias para que houvesse retorno da melhor solução. O gráfico da figura 41 ilustra as respostas médias das iterações de busca. O gráfico da figura 42 ilustra as evoluções individuais de cada simulação realizada na busca de solução do problema.

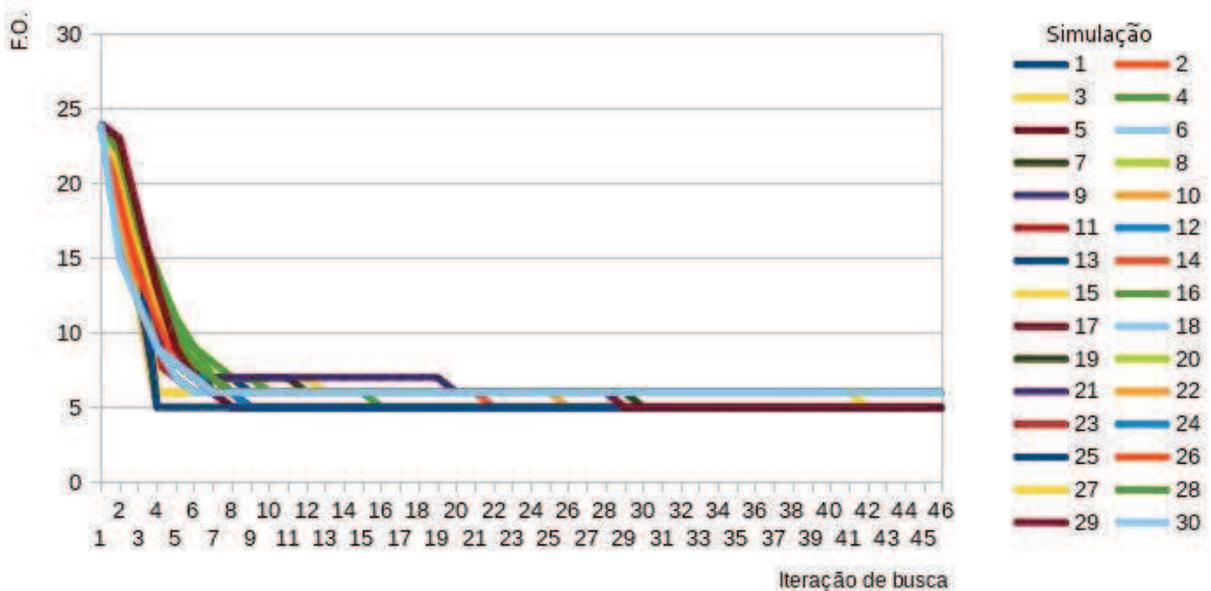
Para um acompanhamento simplificado do processo de busca, uma visualização gráfica da

Figura 41: Representação gráfica das convergências médias das simulações para rede de 11 pontos candidatos e 58 clientes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 42: Representação gráfica das evoluções individuais de cada simulação do problema.



Fonte: Elaborada pelo autor.

evolução da topologia de rede proposta pode ser uma importante aliada no entendimento da solução proposta. Para acompanhamento da evolução, foi escolhida, aleatoriamente, uma das soluções que retornaram o melhor valor do problema em estudo. A evolução do processo de busca da simulação 3 é ilustrado pela figura 43.

Cada passo representado na figura ilustra uma iteração onde uma nova topologia de rede foi

aceita, não necessariamente onde ocorreu uma melhoria da função objetivo.

O estado inicial da geração da solução começa o processo colocando um sistema de medição centralizado em cada ponto candidato.

Em seguida, é aplicada a melhoria inicial, que realiza uma pequena otimização no estado inicial da busca.

Após a aplicação da melhoria inicial, iniciam-se as buscas em vizinhança para que o algoritmo de otimização atue. Os resultados podem ser acompanhados através das iterações mostradas nas figuras 43c, 43d, 43e, 43f, 43g, 43h, 43i, 43j.

### 5.2.1 Avaliação da Rede Instalada *Versus* Rede Proposta

A região geográfica escolhida para estudo já possui uma recente instalação de um sistema de medição centralizado trabalhando em rede. Esta rede, representada na figura 44, recebeu a instalação de 7 conjuntos de medição, distribuídos em pontos aptos a receberem o sistema, garantindo o atendimento a todas as unidades consumidoras alocadas nesta região.

A rede formada se apresenta, então, com a configuração mostrada na tabela 5.

Tabela 5: Configuração de uma topologia real de uma rede formada por sistemas de medição centralizada.

Ponto $i$	Taxa de Atendimento ( $Q$ )	Quantidade de SMC	Custo Associado ( $c_i$ )
2	5	1	1
5	13	2	2
7	10	1	1
10	11	1	3
13	19	2	2
Total Clientes	58	—	—
Total SMC	—	7	—
F.O. Total	—	—	9

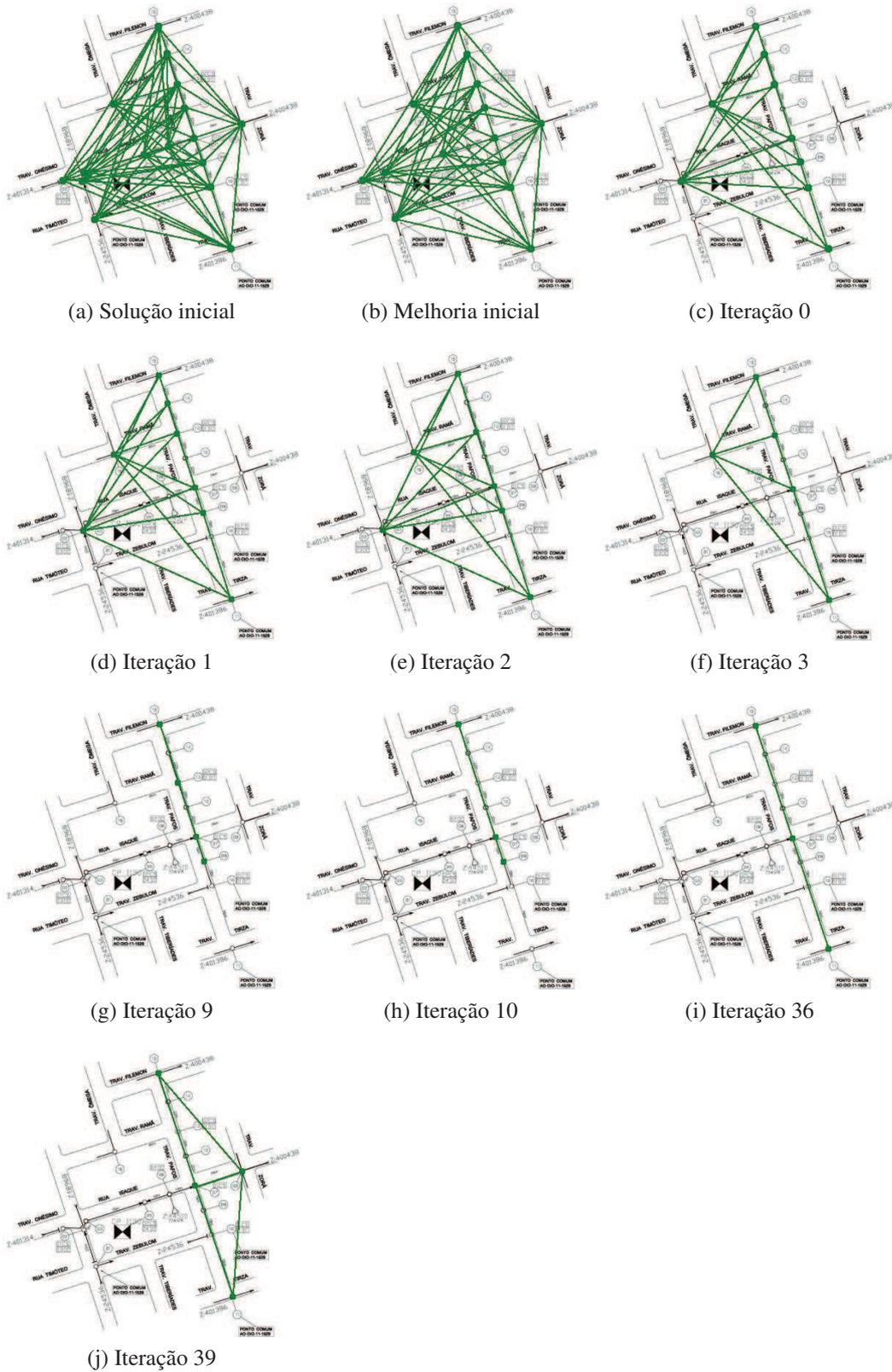
Fonte: Elaborada pelo autor.

Para verificação das redes projetadas pelo algoritmo, foram usados os resultados das 30 simulações. Neste caso, 21 respostas, incluindo as trocas de topologia sem alteração na função objetivo, chegaram aos melhores resultados (menor custo de instalação, determinada pela Função Objetivo).

Nas respostas otimizadas, encontradas pelo algoritmo de busca metaheurística, é possível notar um menor custo de instalação para a formação da rede de comunicações definida pelos sistemas de medição centralizado. Em uma análise simples, pode-se perceber que a utilização das caixas de medição instaladas tendem a esgotar sua taxa de ocupação. Com uma melhor taxa de ocupação, um número menor de equipamentos de rede são instalados, justificando o menor custo encontrado.

Outro ponto importante, é a fuga de pontos candidatos onde deveriam haver manobras de rede no caso de instalação de equipamentos novos. Estes pontos têm seu custo associado mais

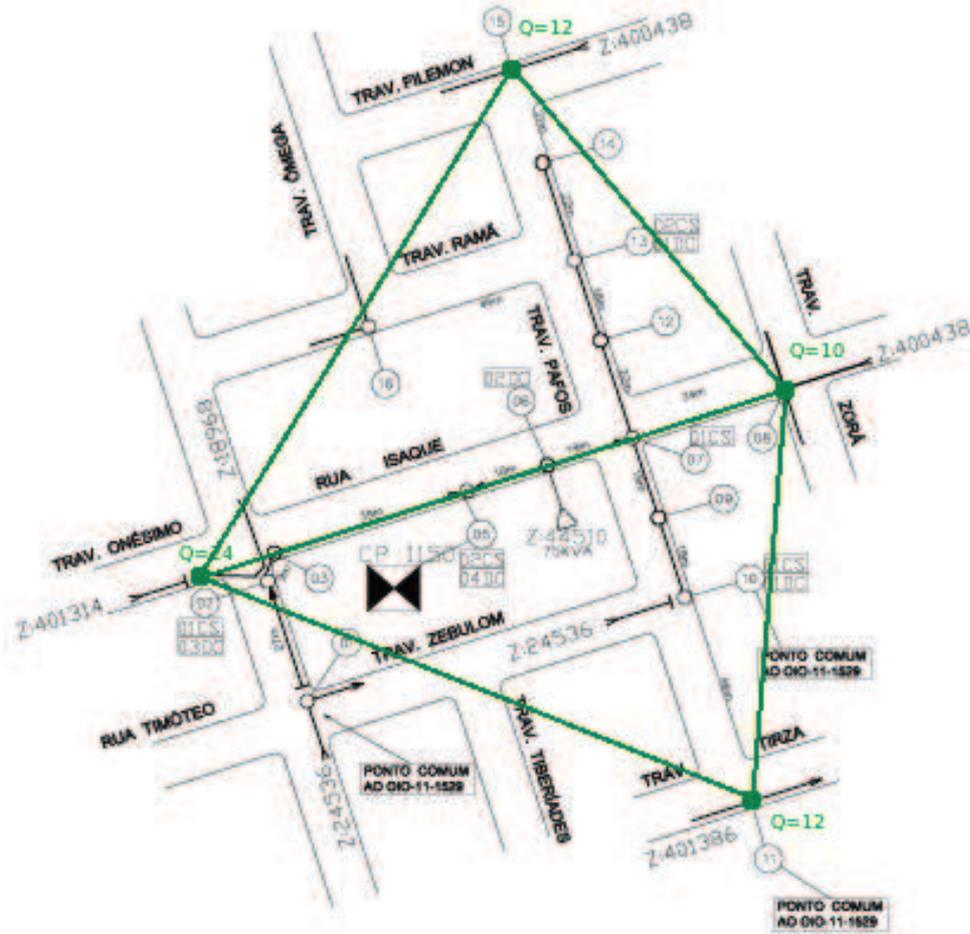
Figura 43: Processo de busca da solução (simulação 3).



Fonte: Elaborada pelo autor.



Figura 45: Exemplo de uma rede projetada pela ferramenta computacional.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 6: Exemplo de configuração da topologia projetada pelo sistema de busca metaheurística.

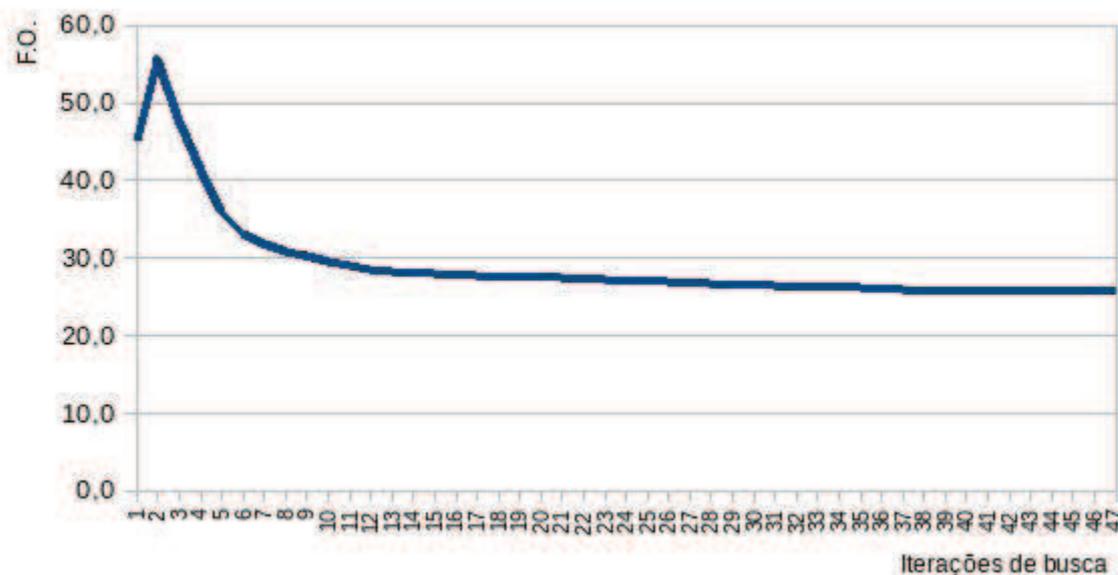
Ponto $i$	Taxa de Atendimento ( $Q$ )	Quantidade de SMC	Custo Associado ( $c_i$ )
4	24	2	1
8	10	1	1
11	12	1	1
15	12	1	1
Total Clientes	58	—	—
Total SMC	—	5	—
F.O. Total	—	—	5

Fonte: Elaborada pelo autor.

- Respostas por vizinhança avaliadas a cada iteração: 30;
- Temperatura inicial =  $10^\circ$ ;
- Temperatura final =  $0,1^\circ$ ;
- Taxa de resfriamento = 0,9;



Figura 47: Representação gráfica das convergências médias das simulações para rede de 28 pontos candidatos e 274 clientes, com taxa de resfriamento 0,9.



Fonte: Elaborada pelo autor.

ser usado como vantagem de diversificação de busca no espaço de soluções pelo algoritmo de otimização.

Na tentativa de resultados melhores, foi realizada a alteração de parâmetros do processo de busca. Como teste inicial, a taxa de decaimento da temperatura foi alterada de 0,9 para 0,95, fazendo com que o resfriamento controlado fosse mais lento que a situação inicial.

O objetivo deste teste é justamente aceitar mais soluções com novas topologias de rede para utilizar a vantagem da diversificação da busca por resultados melhores, sem que se perca o melhor resultado da Função Objetivo.

Novamente, 10 simulações foram realizadas, com a figura 48 ilustrando os resultados médios obtidos para cada iteração do algoritmo principal de otimização.

Para esta configuração, os melhores resultados obtidos para a função objetivo foram de 23 unidades monetárias, com médias para as melhores soluções de 24,2 unidades monetárias (tabela 8)

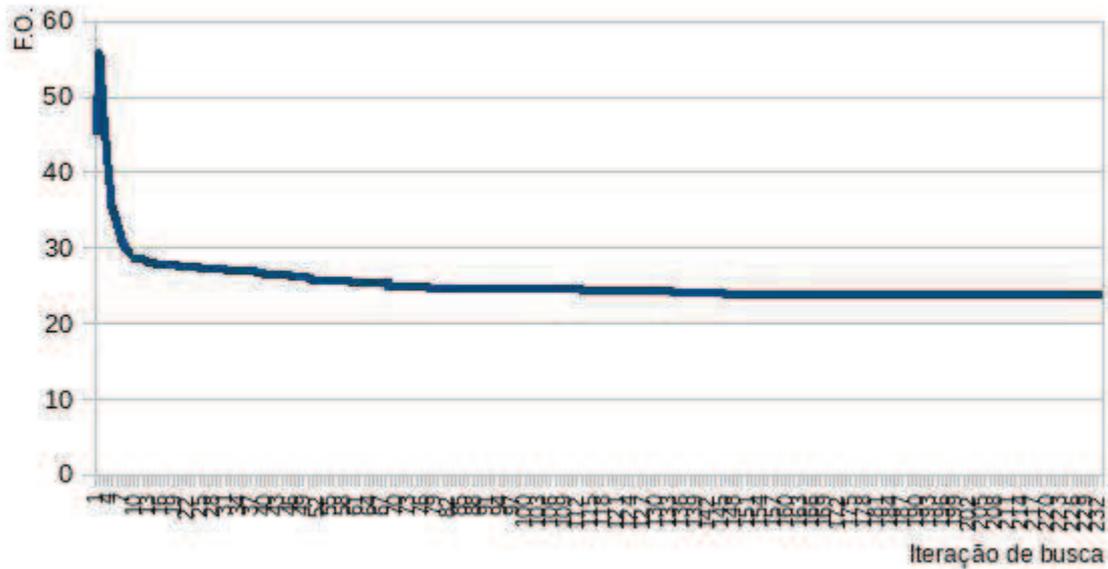
Tabela 8: Resultados médios para simulação de rede com 28 pontos candidatos e 274 clientes e taxa de resfriamento igual a 0,95.

Iteração de Melhor Valor Médio	85
Valor Médio de Solução Ótima	24,2
Desvio Padrão de Solução Ótima	$\pm 1,1972$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com resultados sensivelmente melhorados, mais uma alteração no parâmetro de controle

Figura 48: Representação gráfica das convergências médias das simulações para rede de 28 pontos candidatos e 274 clientes, com taxa de resfriamento 0,95.



Fonte: Elaborada pelo autor.

de taxa de resfriamento foi feita, desta vez alterando para 0,99. Isso remete a um resfriamento bastante lento, extremamente controlado.

Realizadas novamente 10 simulações com estes parâmetros reconfigurados, os resultados médios para cada iteração do algoritmo principal de busca podem ser visualizados na figura 49 e seus valores médios na tabela 9.

Tabela 9: Resultados médios para simulação de rede com 28 pontos candidatos e 274 clientes e taxa de resfriamento igual a 0,95.

Iteração de Melhor Valor Médio	138
Valor Médio de Solução Ótima	23,9
Desvio Padrão de Solução Ótima	$\pm 0,4830$

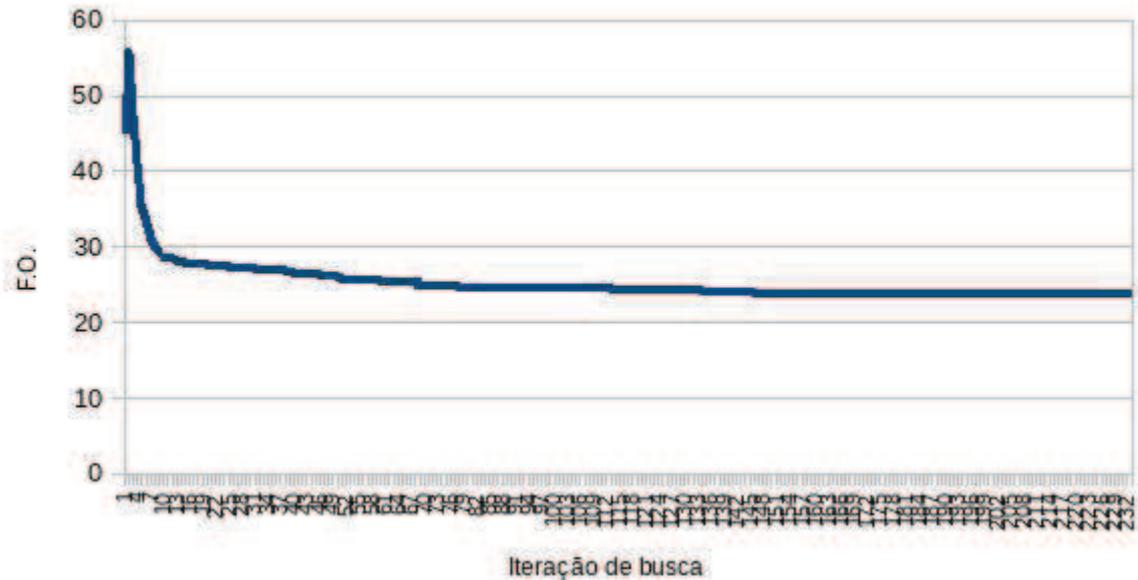
Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao comparar-se graficamente (figura 50) as três simulações, é possível perceber sensíveis melhoras nas soluções apresentadas quando alterado o fator de resfriamento. Estas simulações, influenciadas pela taxa de decaimento da temperatura, permitem a aceitação de resultados diferenciados com maior probabilidade, mas também incrementa o número de iterações que o algoritmo principal de otimização realiza até atingir o critério de parada.

Com a finalidade de facilitar, visualmente, a comparação entre os três resultados, os valores de resultados finais das simulações das situações 0,9 e 0,95 foram extrapolados, pois seu critério de parada não permite o mesmo número de iterações para todas as experiências realizadas.

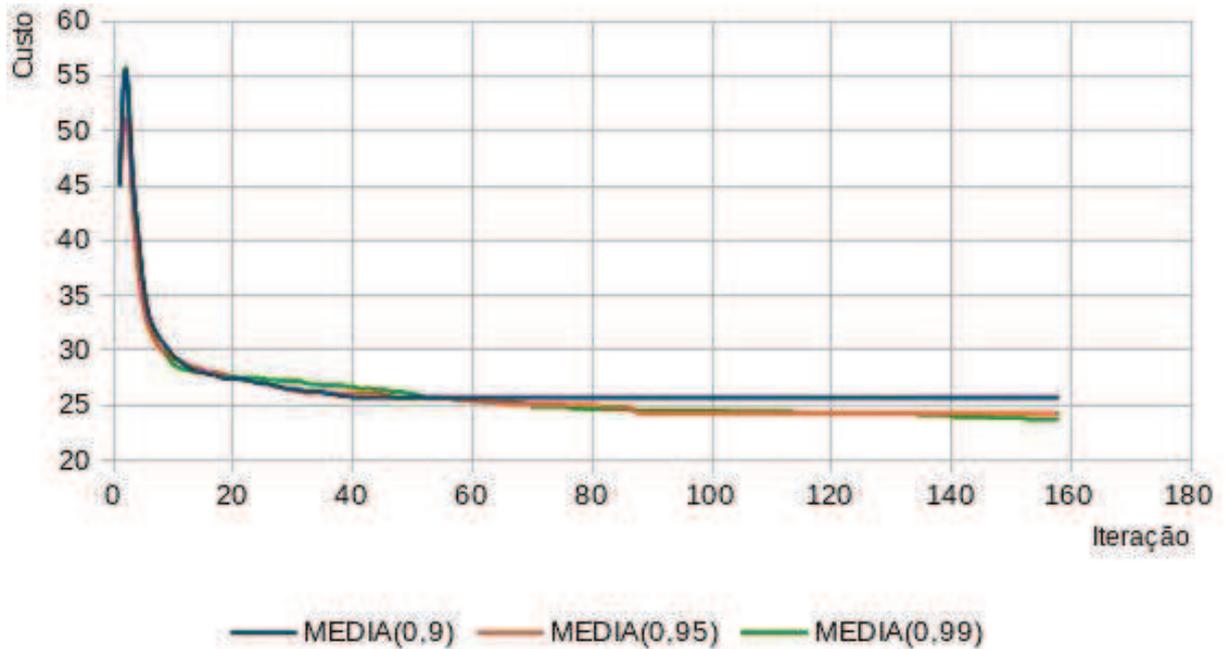
A tabela 10 compara numericamente os três resultados.

Figura 49: Representação gráfica das convergências médias das simulações para rede de 28 pontos candidatos e 274 clientes, com taxa de resfriamento 0,99.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 50: Comparação das médias dos resultados encontrados em simulações com diferentes parâmetros de taxa de resfriamento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 10: Comparação das médias dos resultados encontrados em simulações com diferentes parâmetros de taxa de resfriamento.

	0,9	0,95	0,99	Rede Real
Iteração de Melhor Valor Médio	36	85	138	—
Valor Médio de Solução Ótima	25,7	24,2	23,9	28
Desvio Padrão de Solução Ótima	$\pm 1,4944$	$\pm 1,1972$	$\pm 0,4830$	

Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível notar sensíveis melhorias quanto ao resultado final médio encontrado, mas todas as buscas retornam resultados com valores muito próximos. Também é possível notar que a configuração que demanda maior controle na taxa de resfriamento gera resultados mais homogêneos, dado o menor valor encontrado no desvio padrão dos melhores resultados das amostras testes.

Neste caso, o algoritmo pode ser configurado de tal forma que se otimize o tempo de busca por uma rede de boa configuração, ou a configuração pode priorizar a busca de redes de menor custo, mas com acréscimo de perda de processamento, por respostas de melhor qualidade, embora todos os resultados se mostrem como boas soluções.

Da mesma forma que o verificado no projeto da rede apresentada na seção 5.2, as redes resultantes se aproximam da rede real instalada, mas com ganhos expressivos no custo extraído pela Função Objetivo. Este resultado deve-se ao fato da “fuga” da instalação de sistemas em pontos candidatos de maior custo e da tentativa de maximização da ocupação das caixas instaladas.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com a modernização dos sistemas de distribuição de energia elétrica, que passam a agregar dispositivos eletrônicos dotados de inteligência e equipamentos para comunicações, o projeto de uma rede se torna mais complexo, incluindo novos conceitos que não estão presentes nas redes convencionais.

A adição destes equipamentos tem se tornado frequente, possibilitando a geração de novas redes formadas sobre as redes convencionais de distribuição de energia elétrica. Estas novas redes, chamadas *smart grids*, acrescentam possibilidades de automatização, melhoria de qualidade no serviço de distribuição, qualidade e velocidade no atendimento a clientes e ganhos econômicos, devidos à agilidade na operação do sistema.

Conseqüentemente, a complexidade de projetos destas redes cresce junto com seus benefícios, pois agregam novas variáveis que devem ser consideradas na etapa de projeto. Estas novas variáveis determinam a criação de redes de comunicações e interconexão entre os dispositivos instalados ou projetados para instalação.

Esta dissertação descreveu o desenvolvimento de uma metodologia usada na confecção de um sistema computacional, baseado em um conjunto de regras definidas por um modelamento matemático, para apoio ao projeto de redes de comunicações utilizando sistemas de medição centralizados. Estes sistemas têm por base o uso de medidores inteligentes de tarifação do consumo de energia elétrica, instalados em equipamentos de medição centralizados, formando uma rede de comunicações que cobre uma determinada área geográfica e deve servir todos os clientes ali dispostos, tendo como meta a minimização do custo de instalação dos equipamentos utilizados para a formação da rede.

A estratégia de busca da rede se baseia em uma ferramenta metaheurística conhecida por *têmpera simulada*, e realiza buscas por topologias de redes apoiadas em formação de vizinhanças, escolhendo melhores resultados de custos de instalação e adequação da solução, respeitando as restrições propostas na modelagem matemática do problema.

Os passos na solução do problema são bem distintos e responsáveis pela formação da estratégia de solução adotada descrita neste trabalho. Inicialmente, foi necessária a identificação do problema proposto, determinando quais seriam os objetivos da busca, suas restrições e os possíveis métodos adotados na busca pelas soluções.

Identificados todos os passos iniciais, foi construído o modelo matemático do problema proposto, que é a tradução matemática na forma de equações e inequações das funções objetivo e de restrições. Nesta etapa, envolveu-se todas as variáveis previstas na determinação do problema.

Em seguida, o sistema computacional de otimização encarrega-se da resolução do problema, aproveitando-se da modelagem matemática e seguindo o conjunto de regras para configuração de redes de comunicação para sistemas inteligentes de medição de energia, montado para busca de melhores resultados na otimização das redes de comunicação que trabalham sobre redes de distribuição de energia elétrica.

Como último passo, o teste do modelo e da solução, necessárias para validação do sistema, verifica se os resultados obtidos através da identificação do problema, modelamento matemático e implementação computacional aplicam-se ao problema do “mundo real” e permitem a detecção de possíveis melhorias e novas soluções.

A ferramenta computacional foi desenvolvida na linguagem de programação LabVIEW®, e o *software* de simulação foi executado em um microcomputador com microprocessador Intel®Core i7®, com 6 GigaBytes de memória RAM, em sistema operacional Linux, com cerne (*kernel*) versão 2.6.32.

A metodologia proposta, aplicada ao sistema computacional como forma de simulação, sintetiza redes de comunicação formada por sistemas de medição centralizada, permitindo uma análise muito rápida e dinâmica de topologias de rede a serem projetadas para utilização em projetos de redes de comunicações onde se utilizam sistemas de medição centralizados. Uma rede que atende uma pequena área geográfica, por exemplo a rede analisada na seção 5.2, é capaz de entregar respostas otimizadas, em média, em 29,8273 segundos, totalizando 45 iterações do algoritmo principal de busca, que analisa 30 respostas diferentes de cada vizinhança.

Neste caso, as 30 simulações, ou seja, a análise de, no mínimo, 30 diferentes topologias de redes projetadas pelo sistema, podem ser obtidas em menos de 30 minutos de simulação, viabilizando projetos de novas áreas de cobertura do sistema com grande velocidade e boa precisão.

Para redes maiores, como a analisada na seção 5.3, o tempo de simulação computacional, executado no mesmo sistema operacional e mesmo *hardware*, resultou numa média de 320,685 segundos, totalizando 460 iterações do algoritmo principal de otimização. Se programado o estudo para, no mínimo, 30 simulações, o sistema entrega a resposta em menos de 3 horas de processamento, viabilizando rapidamente o estudo para o projeto e expansão de novas redes.

Outra característica importante que o sistema computacional desenvolvido permite, são as configurações de diversos parâmetros, tanto do algoritmo de busca, quanto da característica da rede que se deseja estudar. Quanto às configurações permitidas ao algoritmo de busca, é possível determinar temperaturas inicial e final, taxa de resfriamento, até distâncias máximas permitidas entre sistemas e entre sistemas e clientes.

Já as configurações das características de rede, é possível a configuração da existência ou não de equipamentos na rede, número máximo de clientes que cada ponto pode receber individualmente, custos associados de instalação de cada ponto, determinada pela existência de equipamentos e necessidades de manobras de rede.

O sucesso da estratégia de otimização apresentada neste trabalho provém justamente do algoritmo de busca aliado às estratégias de formação de vizinhanças, mas também à soma da possibilidade de diferentes configurações de simulação, produzindo diversos tipos de topologias de acordo com a necessidade apresentada pela área geográfica em estudo.

## 6.1 Oportunidades para Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, é possível prever a implementação de novas variáveis na busca pela solução ótima, como, por exemplo, a previsão de obstáculos entre sistemas de medição centralizados, tais como prédios, vegetação ou outros, que pudessem interferir nas comunicações de rádio entre duas centrais de medição, impedindo determinada topologia projetada. Outra implementação interessante é a avaliação da topografia do local. Estas duas implementações podem resultar em uma aplicação com respostas ainda mais refinadas, permitindo configurações até mais robustas.

Outro trabalho que pode gerar bons resultados, é a implementação de técnicas de busca metaheurísticas diferenciadas da técnica proposta, tais como Busca Tabu ou Algoritmos Genéticos, com finalidade de comparação entre os algoritmos propostos, possibilitando o surgimento de novas vizinhanças ou melhorias no algoritmo desenvolvido.



## REFERÊNCIAS

- AARTS, E.; LENSTRA, J. K. **Local search in combinatorial optimization**. New Jersey, EUA: Princeton University Press, 2003.
- AHMED, I.; MOHAMED, A.; FOULY, T.; HU, Y. C. On the Fairness of Frequency Domain Resource Allocation in Wireless Mesh Networks - A Survey. In: GCC CONFERENCE AND EXHIBITION (GCC), 2011. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2011. p. 517–520.
- ALCÂNTARA, M. V. P. Desafios tecnológicos e regulatórios em rede inteligente no Brasil. **O Setor Elétrico**, [S.l.], v. 1, n. 66, p. 48–58, julho 2011.
- ALRASHED, S.; MARIMUTHU, P. N.; HABIB, S. J. Optimal deployment of actors using Simulated Annealing within WSN. In: TELECOMMUNICATIONS (ICT), 2010 IEEE 17TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 2010. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2010. p. 715–721.
- ARROYO, J. E. C.; MARQUES, T. B. Heurística GRASP Aplicado ao Problema de Alocação de Antenas de Transmissão. In: XXXVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2006, Goiânia, GO. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2006. p. 1345–1356.
- ENVIRONMENT, H. Australian Government Minister for the; ARTS the. **Smart Grid, Smart City A new direction for a new energy era**. [S.l.: s.n.], 2009.
- BARRETO, M. B. **Estratégias para Planejamento e Recomposição em Redes de Telecomunicações**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2011.
- BERTSIMAS, D.; TSITSIKLIS, J. Simulated Annealing. **Statistical Science**, [S.l.], v. 8, n. 1, p. 10–15, 1993.
- CHEN, X.; CHEN, X.; ZHANG, X. Crew scheduling models in airline disruption management. In: INDUSTRIAL ENGINEERING AND ENGINEERING MANAGEMENT (IE EM), 2010 IEEE 17TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 2010. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2010. p. 1032–1037.
- CHIU, P.; LIN, F. A simulated annealing algorithm to support the sensor placement for target location. In: ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, 2004. CANADIAN CONFERENCE ON, 2004. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2004. v. 2, p. 867–870.
- CHVATAL, V. A Greedy Heuristic for the Set Covering Problem. **Mathematics of operation Research**, [S.l.], v. 4, n. 3, p. 233–235, ago 1979.
- FEOFILOFF, P.; KOHAYAKAWA, Y.; WAKABAYASHI, Y. **Uma Introdução Sucinta à Teoria dos Grafos**. São Paulo, SP: Universidade de São Paulo – Instituto de Matemática e Estatística, 2011.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear : modelos e algoritmos**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: Campus, 2000.
- GROSSMANN, T.; WOOL, A. Computational experience with approximation algorithms for the set covering problem. **European Journal of Operational Research**, [S.l.], n. 101, p. 81–92, may 1997.

GRZEIDAK, E.; CORMANE, J.; LELES FERREIRA FILHO, A. de; ASSIS, F. Qualidade da energia elétrica no contexto de smart grid. **O Setor Elétrico**, [S.l.], n. 68, p. 48–56, sep 2011.

HARDIN, D. Smart Grid and Dynamic Power Management. In: **Energy Management Systems**. [S.l.]: InTech, 2011. v. 1, p. 229–252.

HERNANDES, L.; PICCOLO, L.; MINCOV, N.; LEITE, C.; CASTILHO, R.; FERREIRA, N.; ROMANO, R. Implantação de projetos piloto de redes inteligentes no Brasil. **O Setor Elétrico**, [S.l.], n. 67, p. 52–59, agosto 2011.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to operations research**. 8. ed. Boston, MA, EUA: McGraw-Hill, 2005.

HOFFMAN, K. L.; PADBERG, M. Set Covering, Packing and Partitioning Problems. In: **Encyclopedia of Optimization**. [S.l.]: Springer, 2009. p. 3482–3486.

[HTTP://WWW.NI.COM/LABVIEW/WHATIS/PT/](http://www.ni.com/labview/whatis/pt/). **O que é o LabVIEW?** 2012.

KAPSE, V. S.; SHRAWANAKAR, U. N. Survey of channel assignement schemes in wireless mesh network. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS COMPUTER TECHNOLOGY (ICECT), 2011. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2011. v. 3, p. 103–107.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by Simulated Annealing. **Science**, [S.l.], n. 4598, p. 671–680, may 1983.

LIVRAMENTO, S. **Algoritmos Genéticos para o Problema de Localização de Recursos em Rede Telefônica**. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2004.

LUHUA, Z.; ZHONGLIN, Y.; SITONG, W.; RUIMING, Y.; HUI, Z.; QINGDUO, Y. Effects of Advanced Metering Infrastructure (AMI) on Relations of Power Supply and Application in Smart Grid. In: CHINA INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION (CICED), 2010., 2010, Pequim, China. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5.

METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A. W.; ROSENBLUTH, M. N.; TELLER, A. H. Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. **The Journal of Chemical Physics**, [S.l.], v. 21, n. 6, p. 1087–1092, jun 1953.

MOTTA, L. C. S. **O Problema de Recobrimento por Rotas: algoritmos e regras de redução**. 2010. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2010.

NEMHAUSER, G. L.; WOLSEY, L. A. **Integer and combinatorial optimization**. New York, NY, EUA: John Wiley & Sons, 1999.

PAPADIMITRIOU, C. H.; STEIGLITZ, K. **Combinatorial optimization: algorithms and complexity**. Mineola, NY, EUA: Dover, 1998.

PIQUEIRA, A. **Metodologia para Evolução Topológica de Redes Ópticas de Transmissão – Implantação da Tecnologia ASON**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Universidade de Brasília, 2008.

PIROTTI, R. P.; ZUCCOLOTTO, M. Transmissão de dados através de telefonia celular: arquitetura das redes gsm e gprs. **Revista Liberato**, [S.l.], v. 10, n. 13, p. 81–89, janeiro 2009.

PIROTTI, R. P.; ZUCCOLOTTO, M. Transmissão de dados através de telefonia celular: avaliação de desempenho de uma conexão de dados utilizando gprs. **Revista Liberato**, [S.l.], v. 10, n. 14, p. 187–199, julho 2009.

REIS, D. C. S. dos. **Um Algoritmo Branch and Bound para o Problema da Alocação Ótima de Monitores de Qualidade de Energia Elétrica em Redes de Transmissão**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, 2007.

REIS, D. C. S.; SILVA, A. P. A. da. Alocação de Monitores de Qualidade de Energia. In: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 2010. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2010.

XIAO-MIN, B.; JUN-XIA, M.; NING-HUI, Z. Functional Analysis of Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY, 2010. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2010.