

# Metaheurística Guia para Alocação Ótima de Sistemas de Medição Centralizados em *Smart Grid*

Eduardo Augusto Martins  
Escola Politécnica Unisinos  
São Leopoldo – RS – Brasil  
Email: eamartins@unisinos.br

José Vicente Canto dos Santos  
Escola Politécnica Unisinos  
São Leopoldo – RS – Brasil  
Email: jvcanto@unisinos.br

Maicon Coelho Evaldt  
PPGEE UFSM  
Santa Maria – RS – Brasil  
Email: mcevaldt@gmail.com

**Resumo**—Sistemas de medição centralizados (SMC) de energia são atualmente uma escolha para automatizar redes e garantir o funcionamento do complexo sistema de distribuidoras de energia elétrica. Estes sistemas compõem as chamadas *smart grids*, redes inteligentes de geração, transmissão e distribuição, 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. A utilização de infraestruturas avançadas de medição, baseada em SMC, 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 descreve o desenvolvimento de uma solução computacional, baseada em um método de busca metaheurística conhecido como *Simulating Annealing*, guiada por outras heurísticas e formulada como um problema de recobrimento, para apoio à concepção de projetos de redes otimizadas de infraestrutura avançada de medição que utilizam equipamentos 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. A estratégia apresenta bons resultados na formação de topologias de redes de comunicação para sistemas de medição centralizada e na otimização da utilização de equipamentos, reduzindo custos de instalação na rede.

**Palavras chave** — Metaheurísticas, *Simulated Annealing*, *Smart Grids*, Distribuição de Energia Elétrica.

## I. 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 [1]. 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.

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 radiofrequência (RF) em função de obstáculos e distâncias impossibilitando a instalação de equipamentos, equipamento já instalados, topologias de redes, entre outras [2].

### A. Objetivos e Justificativas

Este trabalho aborda 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 considera as variáveis envolvidas no projeto de uma rede de comunicações para instalação de sistemas de medição centralizados de energia elétrica.

Como segundo objetivo, a implementação de um algoritmo computacional que realiza a busca pela solução do problema do recobrimento em um complexo espaço de buscas, 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, a metaheurística *simulated annealing* [8], do termo em português “têmpera simulada”, ou “recozimento simulado”, e as estratégias de buscas guiadas por este algoritmo são alvo principal da implementação computacional.

O algoritmo *simulated annealing*, é um algoritmo de busca metaheurística em trajetória, que utiliza o critério de Metropolis [9]. Frequentemente usada para procura de soluções ótimas

globais em um grande espaço de estados. Realiza buscas em espaço de estados discretos, provendo soluções aceitáveis otimizadas.

Este trabalho descreve técnicas usadas na implementação de um aplicativo 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, na técnica de 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.

O aplicativo foi desenvolvido em LabVIEW®, uma linguagem de programação gráfica fornecida pela empresa National Instruments® [3].

## II. MODELAGEM DO PROBLEMA

### A. Função Objetivo

O problema abordado é modelado de acordo com um problema de programação linear clássico, denominado de problema do recobrimento. A formulação da Função Objetivo busca minimizar o custo de implementação de uma rede de comunicações para SMC (equação (1)). Os sistemas da rede são instalados em vias aéreas de distribuição, em postes de iluminação pública, que são os candidatos à receberem ou não um equipamento.

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

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).

$$x_i = \begin{cases} 1; & \text{se o conjunto SMC está instalado; ou} \\ 0; & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (2)$$

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

### B. Sistema de 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, modeladas por um grafo.

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 (3) 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 (3)):

$$u_i = \sum_{j=1}^n d_{ij} \cdot x_j \geq 2 \quad j = 0; 1; \dots; n, \quad (3)$$

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.

Outras restrições são modeladas, como, por exemplo, todos os clientes devem ser atendidos pelo serviço de eletricidade ( $M_k$ ), deve-se atender um critério de número limite de clientes atendidos para cada SMC ( $Q_i$ ), distância entre aplicação e cliente ( $\beta_{ki}$ ) e distância máxima entre as aplicações ( $\alpha_{ij}$ ).

Respeitando todas as restrições impostas, a modelagem se apresenta, finalmente, da seguinte forma:

$$\text{Minimizar: } z = \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i \quad \begin{array}{l} i = 0; 1; \dots; n \\ c = 1; 2; \dots \\ x = \{0; 1\} \end{array} \quad (4)$$

$$\text{Sujeito a: } u_i = \sum_{j=1}^n d_{ij} \cdot x_j \geq 2 \quad \begin{array}{l} i; j = 0, 1, \dots; n \\ x = \{0; 1\} \end{array}, \quad (5)$$

$$M_k = 1 \quad k = 0; 1; \dots; n, \quad (6)$$

$$Q_i \leq 12 \cdot N \quad \begin{array}{l} i = 0; 1; \dots; n \\ N = \{0; 1; \dots\} \end{array}, \quad (7)$$

$$\beta_{ki} \leq L \quad \begin{array}{l} i; k = 0; 1; \dots; n \\ L \in \mathbf{R}_+^* \end{array}, \quad (8)$$

$$\alpha_{ij} \leq P \quad \begin{array}{l} i; j = 0; 1; \dots; n \\ P \in \mathbf{R}_+^* \end{array}. \quad (9)$$

Leva-se em conta, ainda, a necessidade de ocorrência de manobra na rede, caso o ponto candidato possua algum impeditivo imediato de instalação (equação (10)), contribuindo diretamente com o custo  $W$  do candidato  $c$ :

$$c_i = \begin{cases} 1; & \text{não existe necessidade de manobra na rede;} \\ W_i; & \text{necessidade de manobra na rede.} \end{cases} \quad (10)$$

## III. ESTRATÉGIAS DE OTIMIZAÇÃO

O algoritmo selecionado para a estratégia de otimização do problema é uma busca metaheurística que imita o processo de têmpera de materiais e é considerado um método altamente confiável na solução de problemas de otimização combinatória [4]. 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, análogo ao processo de têmpera dos metais, é executado diversas vezes em cada patamar de temperatura e seleciona o melhor resultado encontrado no patamar corrente para compará-lo à solução atual.

A ferramenta computacional desenvolvida é dividida em camadas, onde cada camada representa um autômato finito

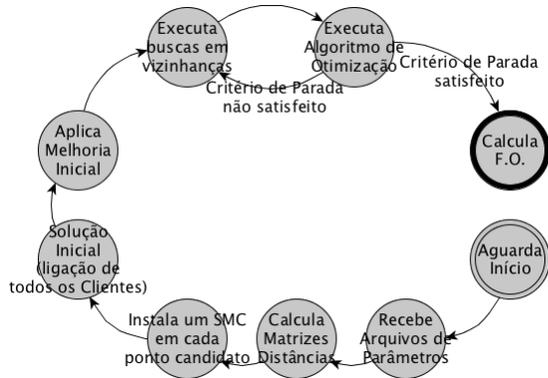


Figura 1: Autômato finito (cerne da ferramenta proposta).

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. O cerne da ferramenta computacional está subdividida em estados distintos (figura 1).

O algoritmo busca otimizar o problema por uma estratégia de busca em vizinhança. A vizinhança é um conjunto de soluções geradas a partir de uma solução candidata. As funções de vizinhança dependem do problema em consideração. Gerar boas funções de vizinhança tende a gerar soluções locais de alta qualidade e é um dos desafios das buscas locais [5]. Para expressar uma função de vizinhança, 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 vizinhança será mapeada como mostra a equação (11):

$$N : P \rightarrow 2^P, \quad (11)$$

e definida para cada instância do problema [6], que leva as soluções de  $P$  em um subconjunto deste mesmo conjunto de soluções (equação (12)):

$$N(p) = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}. \quad (12)$$

O algoritmo de otimização é executado após as estruturas de vizinhança retornarem seus resultados. 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.

#### A. Geração de Vizinhanças – Estratégia 1

A primeira estratégia adotada para a geração das soluções de vizinhança baseia-se no trabalho apresentado por [4]. Com

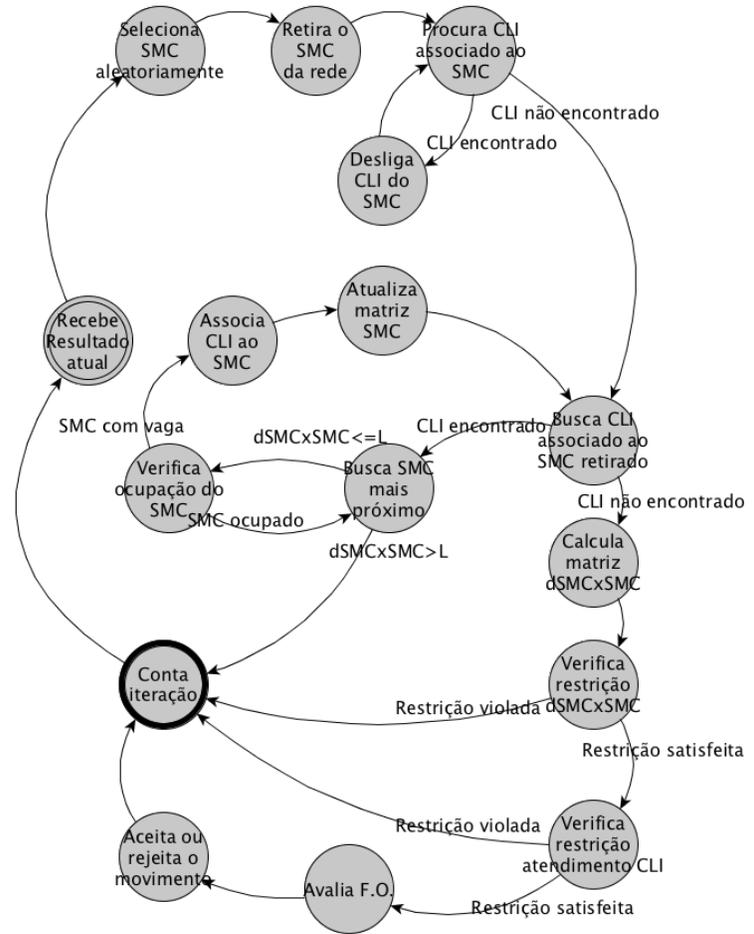


Figura 2: Autômato de busca em vizinhança (estratégia 1).

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 2). 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.

#### B. Geração de Vizinhanças – Estratégia 2

Esta estratégia baseia-se no trabalho proposto por [7], 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 3). Como a situação anterior, esta busca trabalha com um contador de iteração, avaliando múltiplas soluções a cada iteração do algoritmo principal de otimização.

#### C. Geração de Vizinhanças – Estratégia 3

Esta estratégia assemelha-se a anterior, mas tem objetivo de maximizar o uso das caixas de medição ocupando todos

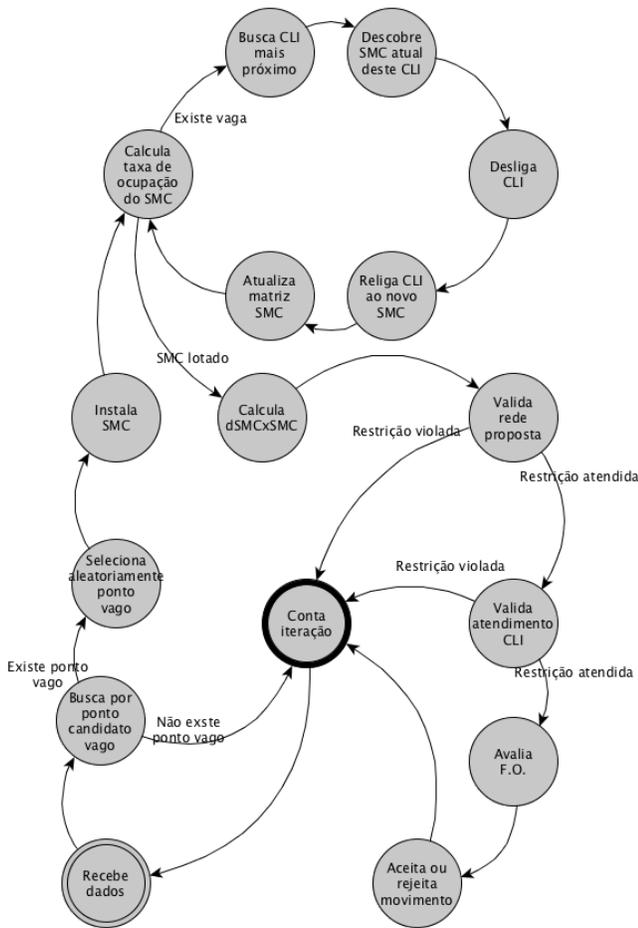


Figura 3: Autômato de busca em vizinhança (estratégia 2).

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 a este ponto, na tentativa de agrupar clientes próximos em um único sistema de medição centralizado, com altas taxas de ocupação (figura 4). Esta busca também é guiada por um contador de iterações, avaliando múltiplas soluções a cada iteração do algoritmo principal de otimização.

#### D. Geração de Vizinhanças – Estratégia 4

Esta estratégia de formação de vizinhanças tem por objetivo excluir o sistema de medição centralizado com custo de instalação associado mais elevado. Este algoritmo busca o ponto  $i$  de instalação com maior  $c_i$  e retira-o da rede, realocando os clientes  $k$  às caixas de medição mais próximas.

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

#### E. Geração de Vizinhanças – Estratégia 5

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

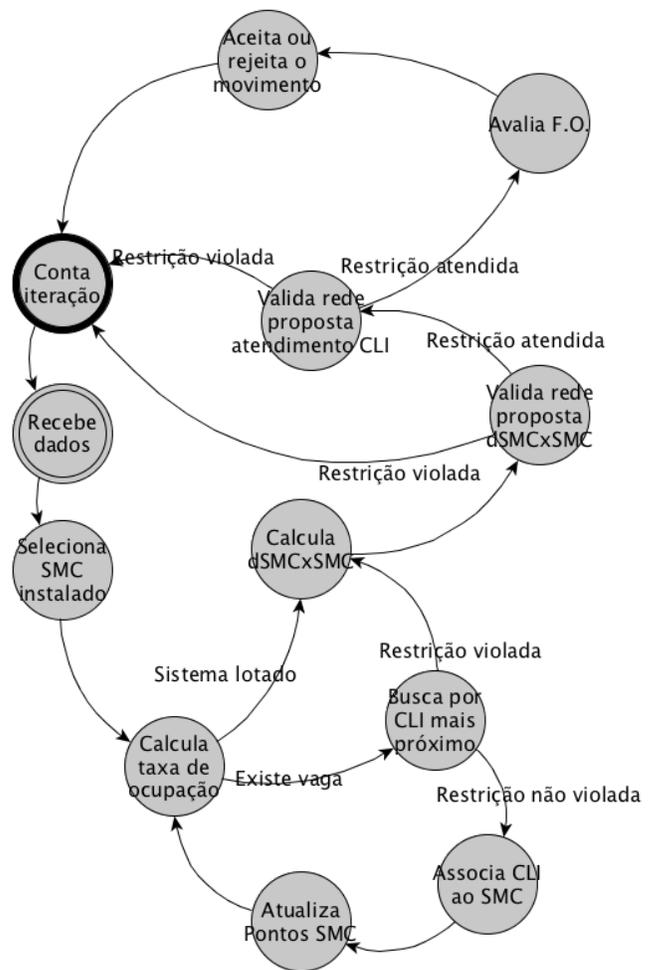


Figura 4: Autômato de busca em vizinhança (estratégia 3).

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.

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

#### F. 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.

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, fugindo de armadilhas “locais”.

Outra forma de diversificação proposta, é a comparação



