

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL PARA PROJETOS DE REDES DE COMUNICAÇÃO DE INFRAESTRUTURAS AVANÇADAS DE MEDIÇÃO COM USO DE UMA ESTRATÉGIA METAHEURÍSTICA

EDUARDO AUGUSTO MARTINS*, JOSE VICENTE CANTO DOS SANTOS*

*UNISINOS - Universidade do Vale do Rio dos Sinos
Av. Unisinos, 980 - Bairro Cristo Rei - CEP 93.022-000
São Leopoldo, RS, Brasil

Emails: eduardo.zuzu@gmail.com, jvcanto@unisinos.br

Abstract— Centralized systems of energy measurement is a choice for automating networks and ensure the competitiveness of distributors electricity, making calls smart grid of generation, transmission and distribution. In Brazil, unpublished work using an advanced metering infrastructure in areas of large urban concentrations, has aimed to reduce or eliminate loss of revenue, emerging as a novelty in the application of smart grids. This paper describes the development of a computational solution based on metaheuristic Simulated Annealing, using the classical model for the Covering Problem, for networks designs optimized of measurements, minimizing installation costs. The methodology applied to simulations, allows a rapid and dynamic topologies projects. The strategy gives satisfactory results topologies networks to centralized systems of measurement, as well as optimize the use of equipment, reducing installation costs in the network.

Keywords— Optimization in electrical systems, Simulated Annealing, Covering Problem, Smart grids, Advanced Meter Infrastructure.

Resumo— Sistemas centralizados de medição de energia são uma escolha para automatizar redes e garantir a competitividade de distribuidoras de eletricidade, compondo as chamadas *smart grids*, redes inteligentes de geração, transmissão e distribuição. No Brasil, um trabalho inédito utilizando uma infraestrutura avançada de medição, em áreas de grandes concentrações urbanas, tem objetivo de diminuir ou eliminar perdas de faturamento, emergindo como novidade na aplicação de redes inteligentes. Este trabalho descreve o desenvolvimento de uma solução computacional, baseada na busca metaheurística *Simulated Annealing*, considerando a modelagem do clássico Problema do Recobrimento, para projetos de redes otimizadas de medição, minimizando custos de instalação. A metodologia, aplicada com simulações, permite uma análise rápida e dinâmica de topologias de projetos. A estratégia apresentou bons resultados de topologias de redes de comunicação para sistemas de medição centralizada, bem como otimização na utilização de equipamentos, reduzindo custos de instalação na rede.

Keywords— Otimização em sistemas elétricos, *Simulated Annealing*, Redes inteligentes, Infraestrutura Avançada de Medição.

1 Introdução

O aumento da complexidade nas redes de energia com a aplicação de sistemas distribuídos, baseado na troca de informações entre equipamentos, formando novas redes, também de alta complexidade, emerge da utilização de sistemas eletrônicos dotados de novas funcionalidades (Hardin, 2011) (Alcântara, 2011). 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.

A elaboração de projetos de sistemas de distribuição de energia elétrica, que consistem em produtos gráficos dos planejamentos de instalação de equipamentos, deve conter todas as informações necessárias para o perfeito entendimento do projeto e execução da obra. 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 (Alcântara, 2011). Dentro deste contexto, este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de uma solução computacional, baseada em uma metaheurística de busca em trajetória (*Simulated Annealing*) (Aarts and Lenstra, 2003), com modelagem baseada no Problema do Recobrimento (Hoffman and Padberg, 2009), 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 (dos Reis, 2007) (Reis and da Silva, 2010).

2 Metodologia

2.1 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 e é considerado um método altamente confiável na

solução de difíceis problemas de otimização (Chiu and 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. 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. Para que o algoritmo não fique preso à ótimos locais, alguns critérios de diversificação e intensificação da busca são adotados. Como estratégia de diversificação, existe a probabilidade de aceitação de resultados que formam topologias de rede com custos de instalação iguais ao de topologias já projetadas. Isto pode ser considerado como diversificação, pois diferentes topologias de redes geradas no processo de busca podem resultar em mesmo custo total de formação da rede. Como critérios de intensificação, cada patamar de temperatura avalia mais de uma resposta, executando as funções de vizinhança e a seleção de melhores resultados diversas vezes.

2.2 Modelagem Matemática do Problema

A Função Objetivo obedece as regras do Problema do Recobrimento (equação (1)):

$$\text{Minimizar: } z = \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i \quad x_i \in \{0; 1\}, \quad (1)$$

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. O índice i representa um ponto candidato apto a receber um sistema de medição centralizado.

Com base no Problema do Recobrimento, é necessário garantir que todos os sistemas de medição centralizados possuam pelo menos uma adjacência, garantindo a cobertura da rede (equação (2)):

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

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.

Como premissa de instalação, todos os clientes devem receber um medidor de consumo de energia elétrica (equação (3)):

$$M_k = \begin{cases} 1; & \text{se recebeu a aplicação;} \\ 0; & \text{caso contrário;} \end{cases}, \quad (3)$$

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 e o sistema otimiza seu uso para a máxima ocupação de recursos. Porém, existe a possibilidade de instalação de mais de uma caixa em cada ponto apto a receber os sistemas de medição centralizados, modelado pela equação (4):

$$Q_i \leq 12 \cdot N, \quad (4)$$

onde, 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 .

Cada conjunto de medição centralizado tem distância máxima definida até a aplicação, em virtude da ligação dos ramais alimentadores de energia elétrica, expressos em metros. Assumindo esta restrição como a distância euclidiana, temos a restrição definida na equação (5):

$$\beta_{ki} \leq L, \quad (5)$$

onde o índice i representa o ponto com o sistema de medição centralizado instalado, o índice k a identidade do cliente, β 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 .

Os rádios que formarão a infraestrutura de comunicações dispostos na rede *Mesh* tem potência definida e alcance limitado, tornando-se uma restrição, modelada como distância euclidiana e dada pela equação (6):

$$\alpha_{ij} \leq P, \quad (6)$$

onde, os índices i e j representam os pontos aptos a receberem um sistema de medição centralizado, α 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. Para estes casos, assume-se um custo diferenciado para o cálculo da função objetivo, expresso na equação (7):

$$c_i = \begin{cases} 1; & \text{não necessita manobra; e} \\ W_i; & \text{necessita manobra.} \end{cases}, \quad (7)$$

onde, 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 no caso de existir algum impeditivo ou necessidade de manobra.

Finalmente, a modelagem se apresenta da seguinte forma:

$$\text{Minimizar: } z = \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i \quad \begin{array}{l} i = 0; 1; \dots; n \\ c = 1; 2; \dots \\ x = \{0; 1\} \end{array} \quad (8)$$

$$\text{Sujeito a: } u_i = \sum_{i=1}^n d_{ij} \cdot x_i \geq 2 \quad \begin{array}{l} i; j = 0, 1, \dots; n \\ x = \{0; 1\} \end{array} \quad (9)$$

$$M_k = 1 \quad k = 0; 1; \dots; n \quad (10)$$

$$Q_i \leq 12 \cdot N \quad \begin{array}{l} i = 0; 1; \dots; n \\ N = \{0; 1; \dots\} \end{array} \quad (11)$$

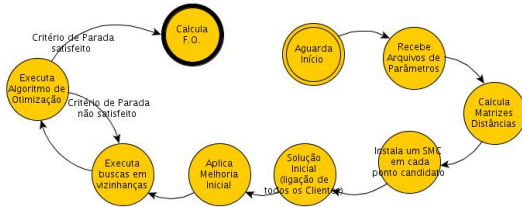
$$\beta_{ki} \leq L \quad \begin{array}{l} i; k = 0; 1; \dots; n \\ L \in \mathbf{R}_+^* \end{array} \quad (12)$$

$$\alpha_{ij} \leq P \quad \begin{array}{l} i; j = 0; 1; \dots; n \\ P \in \mathbf{R}_+^* \end{array} \quad (13)$$

2.3 Modelagem Computacional

A estratégia adotada neste trabalho para otimizar uma rede de infraestrutura avançada de medição, com arquitetura apresentada na figura 1, 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 1: Arquitetura proposta do sistema computacional.



Por sua vez, cada estado do cerne do sistema é formado por um pequeno autômato finito determinístico, representando todos os estados do cerne do sistema.

O sistema inicia o processo 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 e, com base em uma distribuição uniforme de probabilidade, seleciona aleatoriamente um cliente k da rede de distribuição de energia elétrica, conectando-o ao SMC mais próximo.

Em seguida, aplica um estado de melhoria inicial, com o propósito de encontrar uma solução melhor para o início da busca metaheurística. Este autômato trabalha selecionando sistemas de medição centralizados aleatoriamente e completando sua ocupação com clientes mais próximos, eliminando equipamentos instalados pela solução inicial.

Com a topologia inicial definida e melhorada, iniciam-se as buscas por soluções otimizadas, através do algoritmo de otimização e das estruturas de vizinhanças. Cada estrutura apresentada utiliza-se de uma estratégia diferente, gerando diversas soluções que serão selecionadas de acordo com a estratégia de busca adotada. São cinco as estruturas de vizinhanças adotadas na estratégia apresentada.

A primeira estratégia adotada para a geração das soluções de vizinhança baseia-se no trabalho apresentado por Chiu and 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. No caso de algum cliente ficar sem receber a aplicação, os movimentos são descartados, todas as posições retornam à original e um sorteio de um novo ponto é realizado.

A segunda estratégia de geração de vizinhanças baseia-se no trabalho proposto por Alrashed et al. (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.

A terceira 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.

Na quarta estratégia adotada, a 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.

A quinta e última estratégia objetiva 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.

Após o retorno dos melhores resultados de todas as soluções encontradas pelas estratégias de vizinhança, o algoritmo principal de otimização 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.

De posse do melhor resultado entre todos, para este patamar de temperatura, o algoritmo compara a solução gerada com a solução atual do problema. Se a solução gerada apresenta custo total menor, é diretamente aceita como novo estado de solução da busca. No caso de ser uma solução igual ou pior, esta nova solução é aceita com base no critério de probabilidades do algoritmo de otimização (critério de Metropolis (Metropolis et al., 1953)), com probabilidade determinada em função da temperatura atual, solução atual e solução candidata.

3 Simulações e Resultados

A ferramenta computacional foi desenvolvida na linguagem de programação LabVIEW®¹, e o *software* de simulação foi executado em um microcomputador com microprocessador Intel®Core i7®², com 6 GigaBytes de memória RAM, em sistema operacional Linux, com cerne (*kernel*) versão 2.6.32.

3.1 Planejamento de uma Rede com 16 Pontos Candidatos e 58 Clientes

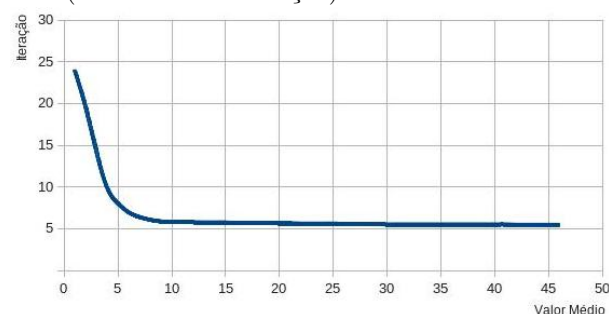
Para esta configuração de rede, as simulações para a busca e projeto consideraram como parâmetros as regras determinadas na tabela 1.

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).

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. A tabela 2 aponta as estatísticas dos resultados das simulações. A figura 2, apresenta a evolução do valor das soluções médias para as 30 simulações, a cada iteração.

Figura 2: Representação gráfica das evoluções médias (Custo *versus* Iteração).



Em comparação com uma rede real, instalada, configurada e em funcionamento, projetada por métodos tradicionais, foram utilizados 6 sistemas de medição centralizados, caracterizando baixo aproveitamento nas taxas de ocupação dos sistemas. Para este projeto, ainda foi observado que alguns destes sistemas estão instalados em pontos candidatos que receberam manobras de rede por já estar associado a outros dispositivos construtivos da rede de distribuição elétrica.

A figura 3 acompanha uma evolução de uma das simulações, partindo da solução inicial, melhoria inicial e iterações, passo a passo, até a extratificação do resultado final. Percebe-se a característica de cada etapa do processo de busca, como, por exemplo, na solução inicial, onde todos os pontos recebem um sistema de medição centralizado.

3.2 Planejamento de Uma Rede com 28 Pontos Candidatos e 274 Clientes

Nesta configuração de rede, as simulações para a busca e projeto consideraram como parâmetros as regras determinadas na tabela 3. O parâmetro da taxa de resfriamento foi testado com diferentes valores, na tentativa de avaliar os resultados alterando-se as probabilidades de aceitação de custos e topologias diferentes no decorrer da busca. Neste caso, 10 simulações para cada taxa de decaimento escolhida foram realizadas.

A tabela 4 extratifica as estatísticas para estas simulações. O gráfico da figura 4 ilustra as evoluções médias a cada iteração, para os diferentes patamares de temperatura selecionados para a realização das simulações e otimização das redes.

Em comparação com uma rede real, instalada, configurada e em funcionamento, projetada

Tabela 1: Regras de planejamento da rede.

Regra	Valor	Unidade
Respostas por vizinhança avaliadas a cada iteração	30	iterações
Temperatura inicial	10	graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$)
Temperatura final	0,1	graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$)
Taxa de resfriamento	0,9	percentual (%)
Máximo de atendimento por ponto candidato	24	clientes
Distância máxima entre SMCxCLI	100	metros (m)
Distância máxima entre SMCxSMC	300	metros (m)

Tabela 2: 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	$\pm 0,5$

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

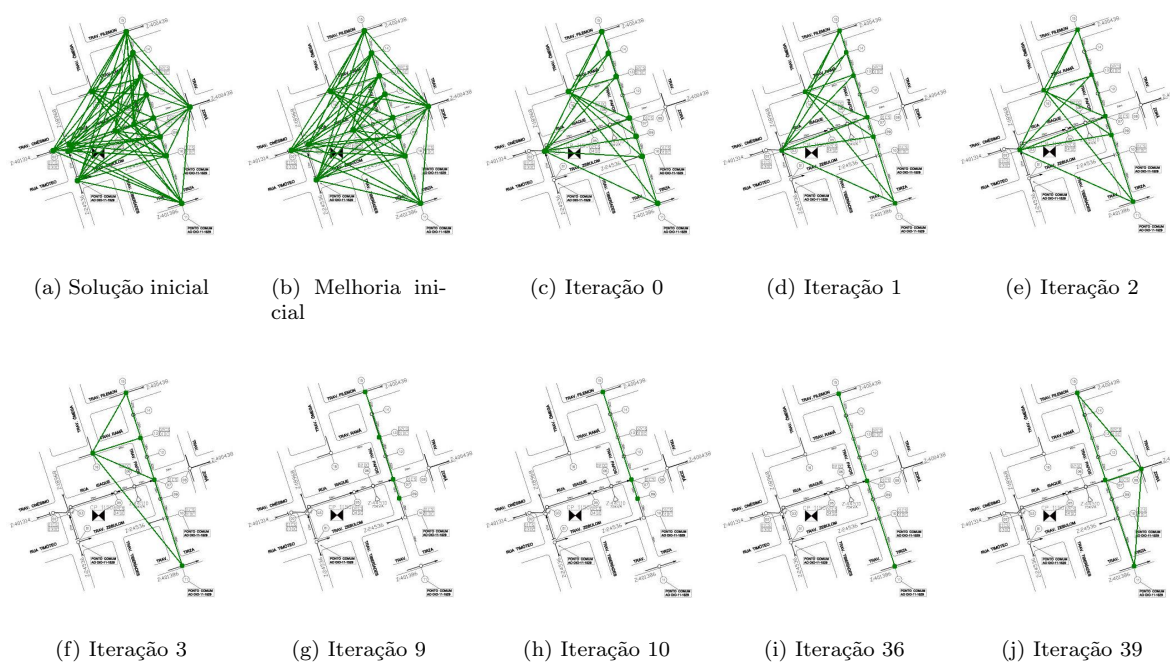


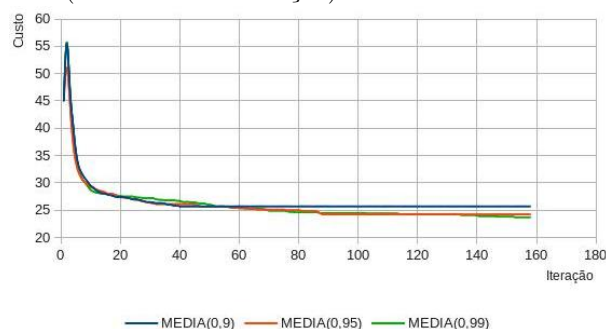
Tabela 3: Regras de planejamento da rede.

Regra	Valor	Unidade
Respostas por vizinhança avaliadas a cada iteração	30	iterações
Temperatura inicial	10	graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$)
Temperatura final	0,1	graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$)
Taxa de resfriamento	0,9 / 0,95 / 0,99	percentual (%)
Máximo de atendimento por ponto candidato	24	clientes
Distância máxima entre SMCxCLI	100	metros (m)
Distância máxima entre SMCxSMC	300	metros (m)

Tabela 4: 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	$\pm 1,4944$	$\pm 1,1972$	$\pm 0,4830$	

Figura 4: Representação gráfica das evoluções médias (Custo versus Iteração).



por métodos tradicionais, observa-se um melhor aproveitamento dos equipamentos instalados para sua formação, implicando em menor custo dispensado na instalação.

4 Conclusões

A metodologia proposta, aplicada ao sistema computacional como forma de simulação, sintetiza redes de comunicação formadas 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. Uma rede que atende uma pequena área geográfica, por exemplo a rede analisada na seção 3.1, 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, pode ser obtida 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 3.2, o tempo de simulação computacional 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, é a configuração de diversos parâmetros, tanto do algoritmo de busca, quanto da característica da rede que se deseja estudar. Quanto as 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 para as configurações das características de rede, é possível a configuração da existência ou não de equipamen-

tos na rede, número máximo de clientes que cada ponto pode receber, individualmente, custos associados de instalação de cada ponto, determinados 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 a soma da possibilidade de diferentes configurações de simulação, produzindo diversos tipos de topologias de acordo com a necessidade apresentada pela área geográfica em estudo.

Referências

- Aarts, E. and Lenstra, J. K. (2003). *Local search in combinatorial optimization*, Princeton University Press, New Jersey, EUA.
- Alcântara, M. V. P. (2011). Desafios tecnológicos e regulatórios em rede inteligente no brasil, *O Setor Elétrico* 1(66): 48–58.
- Alrashed, S., Marimuthu, P. N. and Habib, S. J. (2010). Optimal deployment of actors using simulated annealing within wsn, *Telecommunications (ICT), 2010 IEEE 17th International Conference on*, pp. 715–721.
- Chiu, P. and Lin, F. (2004). A simulated annealing algorithm to support the sensor placement for target location, *Electrical and Computer Engineering, 2004. Canadian Conference on*, Vol. 2, pp. 867–870.
- dos Reis, D. C. S. (2007). Um algoritmo branch and bound para o problema da alocação Ótima de monitores de qualidade de energia elétrica em redes de transmissão, Juiz de Fora, MG.
- Hardin, D. (2011). Smart grid and dynamic power management, *Energy Management Systems*, Vol. 1, InTech, pp. 229–252.
- Hoffman, K. L. and Padberg, M. (2009). Set covering, packing and partitioning problems, *Encyclopedia of Optimization*, Springer, pp. 3482–3486.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N. and Teller, A. H. (1953). Equation of state calculations by fast computing machines, *The Journal of Chemical Physics* 21(6): 1087–1092.
- Reis, D. C. S. and da Silva, A. P. A. (2010). Alocação de monitores de qualidade de energia, *XVIII Congresso Brasileiro de Automática*.