

# UTILIZAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA PARA POSICIONAMENTO DE CONCENTRADORES GPRS EM REDES SMART GRID

GUSTAVO B. DE C. SOUZA\*, FLÁVIO H. T. VIERA\*, ALISSON A. CARDOSO\*, CLÁUDIO R. LIMA\*,  
GETÚLIO A. DE DEUS JÚNIOR\*, MARCELO S. DE CASTRO\*, SÉRGIO G. DE ARAÚJO\*

\**Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação(EMC)*  
*Universidade Federal de Goiás*  
*Goiânia, Goiás, Brasil*

Emails: gustavo2x4@gmail.com, flavio@eeec.ufg.br, alsnac@gmail.com,  
crlima100@gmail.com, getulio@eee.ufg.br, mcastro@eee.ufg.br, granato@eee.ufg.br

**Abstract**— The Smart Grids have become the major focus of development in the field of electricity. It has observed the importance of telecommunications systems to support the Smart Grid. RF Mesh Systems have contributed to much to smart metering, control and automation of the grid. This paper presents a methodology for optimization of ZigBee mesh networks as the communication technology support for a Smart Grid, based on Binary Linear Programming. More specifically, we propose an algorithm to determine the optimal location of GPRS devices concentrators applied to AMI (Advanced Metering Infrastructure), considering the traffic behavior in a Smart Grid. We validate the solution of GPRS concentrator positioning given by our algorithm by simulating the Smart Grid scenarios and collecting traffic statistics such as average delay and traffic load in the concentrator.

**Keywords**— Smart Grid, Simulator, Mesh Networks, Binary Linear Programming, ZigBee.

**Resumo**— As Redes Elétricas Inteligentes têm se tornado o grande foco de desenvolvimento no campo da eletricidade. O que tem-se verificado é a importância dos sistemas de telecomunicações para suporte às Smart Grids. Sistemas de *RF Mesh* têm contribuído muito para ambientes de medição inteligente, bem como controle e automação da rede elétrica. Este trabalho apresenta uma metodologia de otimização de redes *mesh* ZigBee baseada em Programação Linear Binária, propondo um algoritmo para determinação do posicionamento ótimo de dispositivos concentradores GPRS aplicados em Redes AMI (Advanced Metering Infrastructure). Os resultados obtidos são comparados com simulações da rede para validar o algoritmo proposto.

**Palavras-chave**— *Smart Grid*, Simulador, Redes *Mesh*, Programação Linear Binária, ZigBee.

## 1 Introdução

A principal finalidade de um sistema de medição inteligente com base em RF (*Radio Frequency*) *Mesh* (em malha) é permitir que as concessionárias realizem leituras automáticas de dados em intervalos de tempo regulares e ofereçam programas como Resposta a Demanda, ou *Demand Response* (DR), para o controle de cargas críticas. Tais sistemas requerem comunicação bidirecional confiável entre a medição nos pontos finais e o sistema central da concessionária (*Head-End System* - HES). Atualmente, mais de 10 milhões de pontos de medição em todo o mundo são gerenciados via tecnologia *RF Mesh* (LICHTENSTEIGER et al., 2010).

No entanto, grande parte das soluções são proprietárias e não padronizadas para a rede NAN (*Neighborhood Area Networks*), sendo parte da arquitetura das Redes Elétricas Inteligentes, estabelecida no Padrão Técnico de *Smart Grid* do IEEE 2030 (SMART GRIDS IEEE 2030, 2011). Esse novo padrão, lançado em Setembro de 2011 pelo *IEEE Standards Association* (IEEE SA), define as arquiteturas padronizadas, conceitos, elementos, conexões e interoperabilidade de Redes Elétricas Inteligentes. Uma nova padronização específica de Redes Mesh, baseado no Padrão Técnico IEEE 802.15.4g (IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 4g (TG4g), 2011) (evolução do 802.15.4), irá adequar

as atuais e futuras exigências, funcionalidades e interoperabilidade das redes Mesh com topologia NAN, às Redes Elétricas Inteligentes definidas no IEEE 2030.

Na arquitetura de rede considerada em (LICHTENSTEIGER et al., 2010), medidores em pontos finais transmitem e recebem dados a uma velocidade de 9,6 Kbps enquanto os nós coletores (concentradores) são capazes de transmitir e receber nas velocidades de 9,6 Kbps ou o dobro, de 19,2 Kbps. Os concentradores geralmente são montados estrategicamente no topo de postes de iluminação e desfrutam de uma linha de visada de alta velocidade de comunicação vista por diversos medidores. Coletores são implantados em toda a área coberta pela concessionária, cobrindo todo o conjunto de medidores. Uma das topologias mais utilizadas de redes NAN, considera o uso de medidores inteligentes baseado no protocolo de comunicação ZigBee *mesh* IEEE 802.15.4 no acesso final e comunicação GPRS (*Global Packet Radio Service*) no concentrador da rede *Mesh*, conectando diretamente com o *Head-End System* da concessionária. Essa conexão GPRS é considerada como sendo a rede *backhaul* (SAPUTRO et al., 2012).

Por definição, os medidores inteligentes, a rede de comunicação e o *Head-End System* compõem os módulos básicos que definem a tecnologia AMI (*Advanced Metering Infrastructure*), predomi-

nante em *Smart Grid* no que diz respeito a telemedição. A Figura 1 apresenta esta arquitetura.

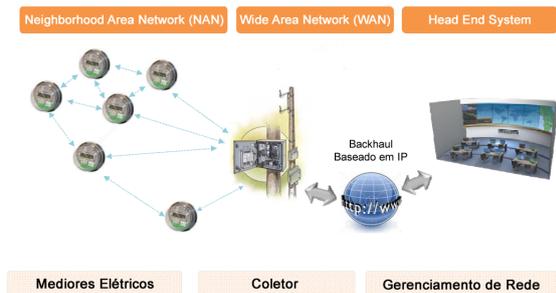


Figura 1: Arquitetura do Sistema RF Mesh Adaptado.

Uma das grandes dificuldades em se projetar uma rede NAN de medidores está no posicionamento dos nós coletores para otimizar custos e melhorar o desempenho do sistema de telemedição (LIU, 2012). Neste trabalho, propõe-se uma nova metodologia de otimização do posicionamento de concentradores em uma rede ZigBee *mesh* de medidores inteligentes utilizando Programação Linear Binária. A Função Custo é estabelecida principalmente pelo número de saltos dados entre os medidores e o(s) concentrador(es), sendo que a sua minimização é restrita aos aspectos de Problemas de Localização de Facilidades. Verifica-se também o desempenho do algoritmo proposto em identificar a melhor opção de uso de concentradores GPRS em Redes *Mesh* Zigbee por meio de simulações em um simulador de rede.

## 2 Metodologia Proposta para Localização de Facilidades

Problemas de localização tratam de decisões sobre onde localizar facilidades, considerando clientes que devem ser servidos, de forma a otimizar um certo critério. O termo facilidades pode ser substituído por gateways, fábricas, depósitos, escolas entre outros, enquanto clientes se referem, por exemplo, a depósitos, unidades de vendas e estudantes. Em geral, os vários centros selecionados que podem ser localizados, podem também ser alocados ao subconjunto de centros que serão abertos. Desta forma, também são conhecidos como problemas de localização/alocação, devido ao processo de alocação dos outros centros aos centros abertos (HOLMBERG et al., 1999).

Neste trabalho o objetivo é posicionar uma facilidade (concentrador GPRS) de forma a se ter a melhor localização possível para a distribuição dos medidores considerada. Dentro da rede *mesh* de medidores estudada, têm-se como solução para o problema a localização ótima do ponto concentrador de dados.

A formulação matemática da localização de facilidades é trabalhada aqui como um problema

de Programação Linear Binária. Considera-se  $m$  o número de potenciais facilidades,  $n$  o número de clientes,  $a_j$  a demanda do cliente  $j$ ,  $b_i$  a capacidade da facilidade  $i$ ,  $f_i$  o custo fixo de se utilizar a facilidade  $i$ ,  $c_{ij}$  o custo de se assistir o cliente  $j$  pela facilidade  $i$ , e  $k$  o número de facilidades utilizadas. Todos os coeficientes são assumidos como inteiros não-negativos. São definidas as seguintes variáveis de decisão:

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{facilidade } i \text{ está sendo utilizada} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{facilidade } i \text{ serve o cliente } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

O problema pode então ser estabelecido pelo seguinte algoritmo de programação inteira:

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^m f_i y_i \quad (3)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n a_j x_{ij} \leq b_j, \forall i, \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, \forall j, \quad (5)$$

$$\sum_{j=1; \forall i}^n x_{ij} - y_i \leq 0, \forall i, j, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^m y_i = k, \forall i, \quad (7)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, j, \quad (8)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \forall i. \quad (9)$$

A função objetivo busca minimizar o custo de implantação da facilidade de forma que todos os clientes sejam atendidos. O conjunto de restrições (4) pode ser referido como a restrição na capacidade da facilidade, assegurando que a demanda servida aos usuários não ultrapassará a capacidade estabelecida. As restrições (5) assegura que cada cliente será servido por apenas uma e não mais que uma facilidade. A restrição (6) determina que apenas facilidades abertas poderão ser atribuídas aos clientes. A restrição (7) garante que  $k$  facilidades serão utilizadas para suprir todos elementos da rede. As restrições (8) e (9) garante que nosso problema contará apenas com variáveis inteiras.

A PLB foi utilizada neste trabalho para mostrar qual ponto concentrador se utilizar na rede *mesh* de medidores em Nova Veneza de forma a maximizar o desempenho, minimizando os custos (neste caso, número de saltos). As considerações feitas sobre o modelo são as seguintes:

- $c_{ij}$  = Número de saltos dados pelos pacotes do medidor  $j$  até a facilidade  $i$ ;
- $f_i$  = custo de instalação da facilidade  $i$  (Igual para todas facilidades possíveis);
- $a_j$  = Tamanho em bytes dos pacotes enviados (200 bytes);
- $b_j$  = Capacidade em bytes da facilidade (512 kbytes).

O principal custo utilizado na otimização foi o número de saltos dados entre cada medidor e o concentrador GPRS (facilidade), sendo que a determinação deste número de saltos é feita por meio de algoritmos de menor caminho, retratando o funcionamento do protocolo de roteamento em redes *mesh* ZigBee.

### 2.1 Estudo de Caso - Cenário de Medição Inteligente

Nas *Smart Grids*, as redes de comunicação são a espinha dorsal do sistema (NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, 2010). Portanto, os recursos necessários para a comunicação entre equipamentos devem ser bem dimensionados e empregados, pois, a maior parte do orçamento diz respeito a este importante pilar das Redes Elétricas Inteligentes.

Os cenários de rede inteligente considerados neste trabalho são de redes *mesh* ZigBee entre os medidores, onde estes estarão ligados a um concentrador que enviará as mensagens via GPRS para a concessionária de energia. Objetiva-se encontrar a posição/localização ideal para o(s) concentrador(es) de forma a obter uma rede o mais eficiente possível, minimizando assim os custos de implantação.

A rede inteligente real que será implantada em nosso Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) envolve uma rede ZigBee que funcionará na frequência de 2,4 GHz com taxa de transmissão de aproximadamente 115 Kbps. Seguindo a tendência das implementações realizadas, os medidores enviam os dados de coleta a cada 15 minutos para o concentrador GPRS.

O objetivo principal das simulações realizadas neste trabalho é avaliar o desempenho da rede considerando diferentes posições para o concentrador (remota) GPRS, assim pode-se determinar qual será a melhor posição para este dentre as possíveis alternativas nos cenários considerados, mostrados nas Figuras 2 e 3. Os cenários em teste representam redes reais, onde os medidores ligados a dois transformadores, contendo um ou mais módulos concentradores GPRS, serão telecomandados. Para o Cenário 1 (Figura 2) são atendidos pela(s) facilidade(ies) 67 medidores, enquanto que no Cenário 2 (Figura 3) existem 72 medidores a serem atendidos.

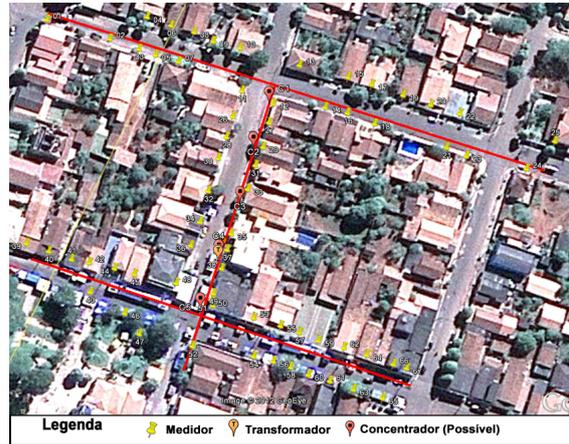


Figura 2: Posições dos Medidores (Estudo de caso 1).

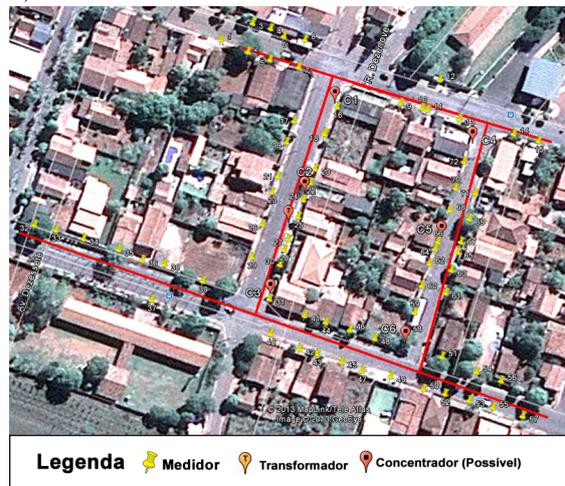


Figura 3: Posições dos Medidores (Estudo de caso 2).

## 3 Simulações e Resultados

Nesta seção foi utilizado a metodologia proposta para otimização das redes apresentadas nos estudos de caso 1 e 2 (Figuras 2 e 3). A otimização é obtida com o posicionamento ótimo do ponto concentrador de dados melhorando o desempenho da rede em questões de tráfego e tempos de retardo.

A seguir são apresentados os valores computacionais praticados nos exemplos aqui apresentados, bem como os resultados encontrados.

Estudo de Caso 1:

- $k=1$ 
  - Tempo computacional = 0,284 segundos;
  - Número de iterações = 19;
  - Ponto escolhido = C5.
- $k=2$ 
  - Tempo computacional = 0,4056 segundos;

- Número de iterações = 122;
- Pontos escolhidos = C1 e C5.

Estudo de Caso 2:

- k=1
  - Tempo computacional = 0,315 segundos;
  - Número de iterações = 23;
  - Ponto escolhido = C1.
- k=2
  - Tempo computacional = 0,7488 segundos;
  - Número de iterações = 327;
  - Pontos escolhidos = C3 e C4.

Também será abordado nesta seção, a implementação do cenários das redes ZigBee no simulador Opnet com conforme costumam nas Figuras 2 e 3. Assim, para cada posição do concentrador avaliouse o comportamento e o desempenho da rede em termos de retardo e tamanho da fila no concentrador. Um vez que o tamanho médio dos pacotes na rede ZigBee de medição inteligente varia entre 100 a 200 bytes, é assumido que os pacotes tem um tamanho médio de 200 bytes (LICHTENSTEIGER et al., 2010).

Sabe-se que os dispositivos ZigBee permitem realizar modo *mesh* de comunicação na rede. Em outras palavras, um dispositivo ZigBee instalado em um medidor pode se comunicar com outro deste dispositivo, e assim por diante, até que a mensagem seja entregue ao concentrador (remota GPRS). Entende-se que na tecnologia Zigbee, a rede encontre os menores caminhos entre os nós e o concentrador (LICHTENSTEIGER et al., 2010)(OBINSON et al., 2008). Portanto, foi assumido nas simulações a seguir que após um certo tempo, a rede encontra esses menores caminhos. Note que isso é diferente dos nós enviarem os pacotes considerando apenas os nós vizinhos (medidores) mais próximos.

As simulações têm como objetivo comprovar os resultados do algoritmo proposto, buscando evidenciar que no caso de apenas um concentrador, o posicionamento em C5 seria o melhor ponto para instalação do concentrador.

### 3.1 Medição Inteligente com um Único Concentrador - Cenário 1

O resultado da otimização para um único concentrador no Cenário 1 (Figura 2), se dá com o ponto escolhido C5. A Figura 4 apresenta o ponto escolhido na rede, bem como as rotas de cada medidor ao concentrador GPRS.

As simulações foram parametrizadas segundo o cenário considerado no estudo de caso 1. Para

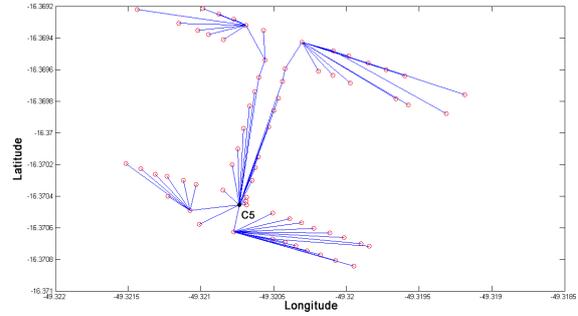


Figura 4: Rotas para o melhor ponto concentrador (C5) - Cenário 1.

este cenário foram analisados o retardo, o tamanho da fila no concentrador e a carga de tráfego do sistema para as posições C1, C2, C3, C4 e C5. A Figura 5 mostra o retardo médio (em segundos) de transmissão dos pacotes no concentrador.

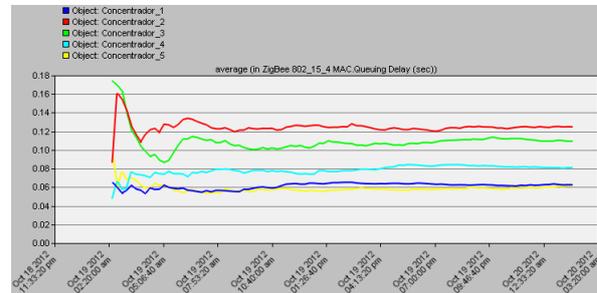


Figura 5: Retardo médio para as cinco posições do concentrador com envio de dados a cada 15 minutos - Cenário 1.

Para este cenário e configuração e levando-se em consideração apenas questões referentes a tráfego, a posição C5 seria escolhida por apresentar um retardo médio menor do que para a posição C1. As simulações com diferentes configurações mostram que para o cenário considerado o algoritmo consegue encontrar a melhor configuração em termos de desempenho de fila de tráfego para o cenário estudado, apresentando como ponto de localização de um único concentrador a posição C5 da Figura 2

### 3.2 Medição Inteligente com Dois Concentradores - Cenário 1

O aumento do número de medidores pode inviabilizar a utilização de apenas um ponto de concentração de dados. Portanto, é necessário que haja diversos concentradores GPRS para que o sistema não fique sobrecarregado. O posicionamento destes concentradores nesta nova problemática não se limita a encontrar as melhores rotas, mas também a avaliar os grupos de medidores que se comunicarão com cada concentrador.

O algoritmo proposto foi utilizado para determinar também o posicionamento de dois concen-

tradores, onde estes funcionam de forma independente. São criadas redes independentes, sendo a concentração de dados dividida entre estes dois pontos de concentração de dados. A Figura 6 apresenta o resultado da utilização do algoritmo, para “k=2”, considerando o Cenário 1.

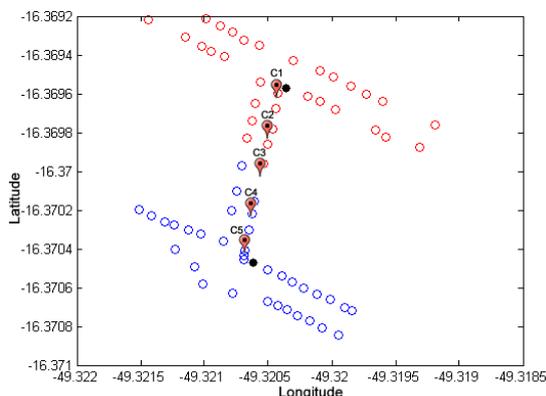


Figura 6: Posicionamento de dois pontos concentradores - Cenário 1.

Com o resultado obtido na utilização do algoritmo foram posicionados dois concentradores para a simulação. As posições C1 e C5 foram escolhidas, reproduzindo a solução apresentada na Figura 6. Para validação do modelo foram simulados dois cenários com dois concentradores, sendo um deles a solução apresentada pelo algoritmo e outro utilizando dois outros concentradores. A Figura 7 mostra que o retardo médio da rede para a utilização de dois concentradores nas posições C1 e C5 é menor que utilizando dois concentradores na posições C2 e C4.

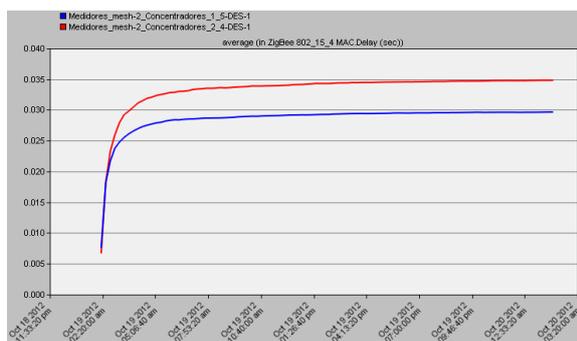


Figura 7: Retardo médio da rede utilizando dois concentradores.

### 3.3 Medição Inteligente com um Único Concentrador - Cenário 2

O resultado da otimização para um único concentrador no Cenário 2 (Figura 3), se dá com o ponto escolhido C1. A Figura 8 apresenta o ponto escolhido na rede, bem como as rotas de cada medidor ao concentrador GPRS.

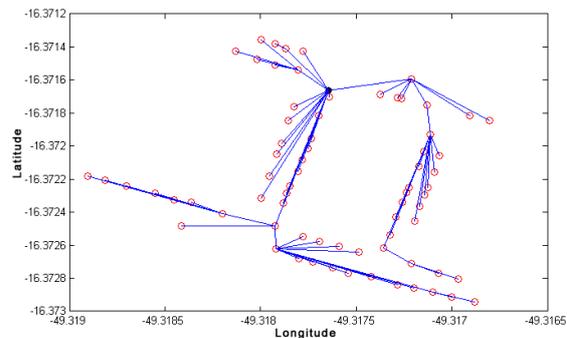


Figura 8: Rotas para o melhor ponto concentrador (C1) - Cenário 2.

As simulações foram parametrizadas segundo o cenário considerado no estudo de caso 2. Repetindo as análises feitas para o Cenário 1 para as posições C1, C2, C3, C4, C5 e C6. A Figura 9 mostra o retardo médio (em segundos) de transmissão dos pacotes no concentrador.

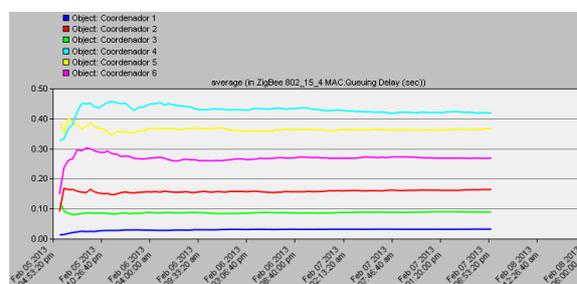


Figura 9: Retardo médio para as cinco posições do concentrador com envio de dados a cada 15 minutos - Cenário 2.

Para o Cenário 2 verificamos claramente que menor *delay* médio praticado entre os pontos concentradores se dá justamente naquele que é determinado pela solução da otimização da rede via o modelo proposto neste trabalho.

### 3.4 Medição Inteligente com Dois Concentradores - Cenário 2

Utilizando para o Cenário 2 “k=2”, ou seja, duas facilidades abertas e disponíveis para o escoamento do tráfego de dados dos medidores, o algoritmo retornou como solução as posições C3 e C4. A Figura 10 apresenta o resultado da utilização do algoritmo, para “k=2”, considerando o Cenário 2.

As posições C3 e C4 foram escolhidas para serem posicionados os concentradores, como a apresentado na Figura 10. O desempenho da rede foi comparado com o posicionamento de dois concentradores próximos aos centros de massa das sub-redes. A Figura 11 mostra que o retardo médio da rede para a utilização de dois concentradores nas posições C3 e C4 é menor que utilizando dois concentradores na posições C2 e C5.

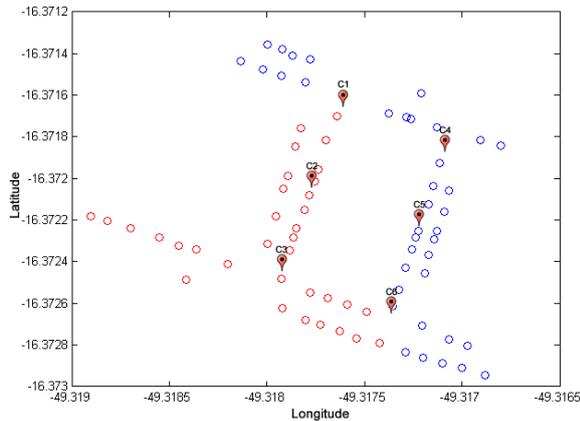


Figura 10: Posicionamento de dois pontos concentradores - Cenário 2.

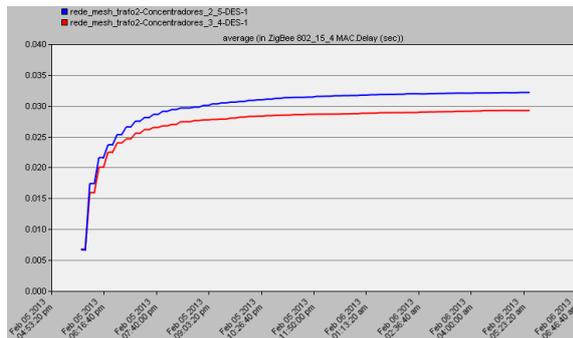


Figura 11: Retardo médio da rede utilizando dois concentradores - Cenário 2.

#### 4 Conclusões

Este trabalho apresentou uma metodologia de posicionamento ótimo de concentradores GPRS em redes *mesh*, visando a minimização do número de saltos das mensagens na rede para melhoria do desempenho da rede em termos de tráfego.

Utilizando Programação Linear Binária foi possível se obter um método de otimização que comprovado via simulações conseguiu trazer ao problema uma solução confiável e, principalmente, podendo ser aplicada em ambientes reais.

A metodologia aqui apresentada de posicionamento de concentradores pode ser aplicada em diferentes cenários, com as mais diversas configurações e quantidades de nós. A proposta foi estabelecida justamente em uma ferramenta de otimização de redes *mesh* de medidores independente de sua configuração ou grandeza, desde que se comporte como apresentado neste trabalho.

Foram estudados dois cenários distintos, aplicando a eles a mesma técnica de otimização. O primeiro cenário conta com 62 medidores sendo elencadas 5 possíveis posições para a implantação de um concentrador GPRS. O segundo cenário possui 72 medidores, sendo estudadas 6 posições possíveis para fixação do ponto concentrador de dados. Em ambos os cenários o algoritmo con-

seguiu encontrar o melhor posicionamento, tanto para um como para dois pontos de concentração de dados. A garantia de escolha do melhor(es) ponto(s) foi conseguida através de simulações computacionais, dando subsídios para a comparação dos resultados.

Neste trabalho foi possível estabelecer uma metodologia para escolha de pontos concentradores em redes *mesh* para sistemas AMI em termos de número de saltos das mensagens. Buscou-se o melhoramento do desempenho da Smart Grid por meio de planejamento das posições dos concentradores. Foram apresentadas evidências técnicas da importância de se planejar a arquitetura de uma rede de medidores.

Como trabalhos futuros é pretendido comparar os resultados teóricos apresentados neste artigo com os da futura implantação da rede.

#### Referências

- HOLMBERG, K., RONQVIST, M. and d. YUAN (1999). An exact algorithm for the capacitated facility location problems with single sourcing, *European Journal of Operational Research* **113**(3): 544–559.
- IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 4g (TG4g) (2011). Smart utility networks.
- LICHTENSTEIGER, B., BJELAJAC, B., MULLER, C. and WIETFELD, C. (2010). Rf mesh systems for smart metering: System architecture and performance, *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE* pp. 379–384.
- LIU, Y. (2012). Wireless sensor network applications in smart grid: Recent trends and challenges, *International Journal of Distributed Sensor Networks* **2012**: 1–8.
- NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (2010). *Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards*, NIST, USA.
- OBINSON, J., UYSAL, M. and SWAMINATHAN, R. (2008). Adding capacity points to a wireless mesh network using local search, *Proc. of IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, IEEE Communications Society, USA, pp. 1247–1255.
- SAPUTRO, N., AKKAYA, K. and ULUDAG, S. (2012). A survey of routing protocols for smart grid communications, *Computer Networks* pp. 2742–2771.
- SMART GRIDS IEEE 2030 (2011). Ieee standard p2030.