

# Modelo e Solução para o Problema de Posicionamento de Agregadores em Redes Elétricas Inteligentes

Guilherme Rolim, Célio Vinicius Neves de Albuquerque,  
Igor Monteiro Moraes

<sup>1</sup>Laboratório MídiaCom, PGC-TCC  
Instituto de Computação - Universidade Federal Fluminense  
Niterói, Rio de Janeiro, Brasil

grolim@id.uff.br, {celio,igor}@ic.uff.br

**Abstract.** *In a Smart Grid infrastructure, smart meters are responsible for keeping track of user energy consumption. This data is periodically sent to one or more data aggregation points (DAP), typically via wireless communication. Efficiently choosing the best positions for installing DAPs is an NP-Complete problem and therefore a difficult task, specially in big cities that may contain thousands of smart meters in a single neighbourhood. Nevertheless, network planning has a major impact on network performance. This work proposes an adaptation of the DAPs positioning problem to a problem in the optimization area known as the Set Covering Problem and a heuristic to solve it. Heuristic and linear programming techniques are compared and results show that the heuristic is capable of obtaining solutions 3% close to the optimal while accelerating 3.5 times the execution duration and reducing 10.5 times the memory consumption in comparison to the exact method.*

**Resumo.** *Em uma rede elétrica inteligente (Smart Grid) , medidores inteligentes armazenam dados de consumo energético de cada residência que são enviados periodicamente a um ou mais agregadores, tipicamente via comunicação sem fio. Escolher eficientemente as melhores posições para agregadores é um problema NP-Completo e, portanto, torna-se uma tarefa difícil, principalmente em grandes cidades que podem conter milhares de medidores em um único bairro. Este trabalho propõe uma adaptação do problema de posicionamento de agregadores em Smart Grids para um problema conhecido da área de otimização como Set Covering Problem e uma heurística para resolvê-lo. As soluções da heurística são comparadas às respostas exatas e avaliadas quanto ao seu desempenho. Os resultados mostram que a heurística é capaz de obter resultados 3% próximos ao ótimo acelerando 3,5 vezes o tempo de execução e reduzindo em 10,5 vezes o consumo de memória se comparado ao método exato.*

## 1. Introdução

As redes elétricas inteligentes (*Smart Grids*) são uma evolução das redes elétricas atuais, pois permitem a comunicação de dados entre consumidores e produtores, além da distribuição de energia elétrica. Esta comunicação, ausente nas redes elétricas convencionais, permite que as empresas elétricas utilizem as informações geradas por consumidores durante a geração, transmissão e distribuição de energia. No entanto, para que as redes

elétricas inteligentes funcionem é necessária a instalação de agregadores de dados e medidores inteligentes, isto é, dispositivos eletrônicos dotados de interfaces de rede para que possam se comunicar. Os medidores e agregadores fazem parte da infraestrutura de medição avançada (*Advanced Metering Infrastructure* - AMI) [Wenpeng 2009], que é uma das principais propostas de aplicação para *smart grids* e cujo objetivo é prover comunicação entre consumidores e concessionária. Nessa infraestrutura, cada residência contém um medidor inteligente responsável por armazenar informações periódicas do consumo de energia elétrica dessa residência. Os dados coletados por estes medidores são transmitidos a um agregador de dados, tipicamente via meio sem fio, evitando gastos na criação de infraestrutura para redes cabeadas. Os agregadores, por sua vez, podem transmitir os dados coletados de uma vizinhança à concessionária de energia. Forma-se, assim, uma rede de comunicação de curta e média distância. Não há uma padronização sobre qual tecnologia deve ser utilizada para comunicação medidor-agregador e agregador-concessionária. Para a primeira, podem ser usados padrões de comunicação para curta distância, como o IEEE 802.15.4 e o IEEE 802.11. Para a segunda, podem ser usadas tecnologias com maior alcance como a rede celular GPRS, 3G, 4G ou o padrão IEEE 802.16.

Um dos maiores desafios para o desenvolvimento de uma infraestrutura de medição avançada é planejar as posições de agregadores de dados. Como em uma rede elétrica inteligente cada residência possui um medidor, verificar manualmente as posições mais adequadas para que agregadores os cubram é uma tarefa praticamente inviável, principalmente em vizinhanças com alta densidade demográfica. Além disso, deve-se levar em consideração a capacidade máxima de cada agregador e posicioná-los de forma que não sobrecarreguem. O planejamento manual para uma cidade inteira, por exemplo, envolveria analisar milhares de medidores, um para cada residência. Adicionalmente, o mal planejamento da AMI resulta em baixo desempenho. Okabayashi observou que uma AMI mal planejada resulta em alto atraso, alto índice de perda de pacotes e baixa resiliência no caso de falha de agregadores [Okabayashi 2014].

Este trabalho propõe uma nova metodologia para o posicionamento automático de agregadores de dados em uma rede elétrica inteligente. As posições geográficas de medidores, as possíveis posições de instalação de agregadores e o alcance médio de um enlace são adaptados para um problema de otimização NP-completo conhecido na literatura, o *Set Covering Problem* (SCP) [Karp 1972]. Solucionando o SCP é possível obter a menor quantidade de agregadores possível para que todos os medidores sejam cobertos e as posições em que deverão ser instalados. Uma heurística é proposta para solucionar o SCP através da divisão do problema em subconjuntos que são resolvidos separadamente de forma exata. A união das soluções de cada subconjunto compõe a solução do problema como um todo. Resultados mostram que essa heurística é capaz de reduzir a quantidade de memória e o tempo de execução sacrificando pouco a qualidade da solução.

O restante deste trabalho está organizado como segue. A Seção 2 explica o conceito de uma infraestrutura de medição avançada. A Seção 3 apresenta trabalhos relacionados. A Seção 4 descreve a formulação matemática do *Set Covering Problem* e como o problema de planejamento com e sem múltiplos saltos foi adaptado a ele. A Seção 5 explica a metodologia proposta para solucionar o problema adaptado. A Seção 6 avalia o desempenho da heurística proposta e a vantagem de se utilizar múltiplos saltos. Por fim, a Seção 7 conclui esse trabalho e apresenta trabalhos futuros.

## 2. A Infraestrutura de Medição Avançada

Em uma infraestrutura de medição avançada (AMI) [Wenpeng 2009] agregadores inteligentes atuam como nós intermediários na comunicação, conectando medidores até uma central. A AMI permite que consumidores tenham informação sobre a rede elétrica, podendo verificar a tarifação e dados de consumo energético em tempo real. Por outro lado, essa infraestrutura também permite às concessionárias obter informações detalhadas sobre o consumo energético de seus usuários, garantindo maior controle na distribuição de energia e evitando desperdícios.

O principal desafio da AMI é conectar os dispositivos inteligentes de forma a se evitar custos desnecessários com infraestrutura [Guimarães et al. 2013]. Por este motivo, é indicado que a comunicação entre dispositivos da AMI seja realizada via meio sem fio ou através de infraestruturas já existentes, como a da própria rede elétrica ou de telefonia. A Figura 1 exibe um exemplo de AMI. Os medidores de cada casa, representados por círculos na figura, conectam-se a um agregador, que transmite dados gerados por esses medidores à concessionária utilizando uma tecnologia de longo alcance. Os agregadores, representados por triângulos, podem ser instalados em postes, como mostra a figura.

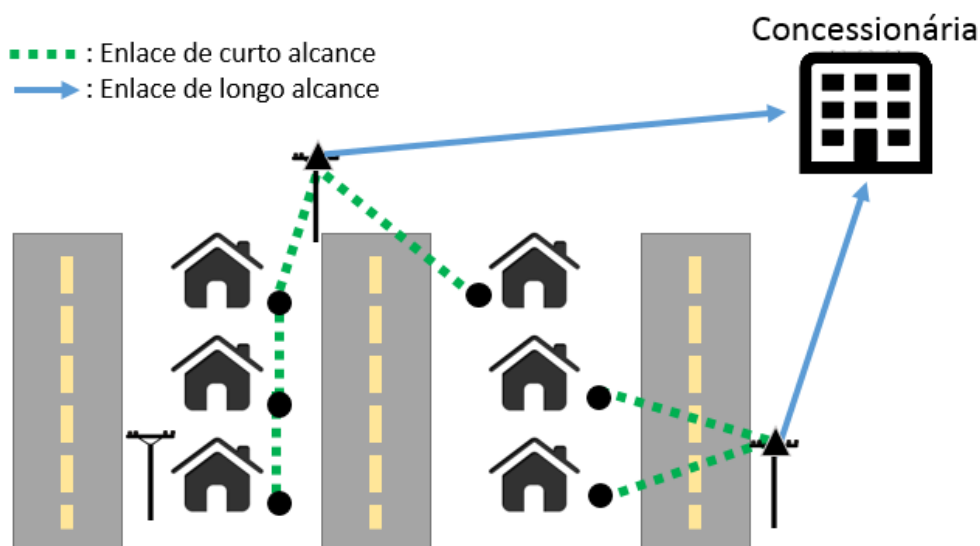


Figura 1. Exemplo de infraestrutura de medição avançada.

Este trabalho assume que a comunicação entre medidores e agregadores é realizada exclusivamente via meio sem fio. Não é escopo deste trabalho abordar a tecnologia utilizada entre agregadores e concessionária. Considera-se apenas que todos os agregadores são capazes de encaminhar os dados gerados pelos medidores.

## 3. Trabalhos Relacionados

Souza *et al.* propõem um mecanismo de posicionamento de agregadores para uma rede com RF-Mesh [Souza et al. 2013]. Nesse trabalho os autores introduzem um algoritmo que identifica a melhor posição para instalação de agregadores baseando-se no número de saltos obtidos pelos métodos *Breadth-First Search*, algoritmo de Dijkstra e algoritmo de Bellman-Ford. A identificação da melhor posição é realizada através

de uma busca exaustiva que compara o número de saltos para cada posição analisada. Adicionalmente, o algoritmo permite o posicionamento de mais de um agregador. Neste caso, o método de clusterização *K-means* é executado previamente, dividindo os medidores em clusters. Para cada cluster, a busca exaustiva é realizada nas posições mais próximas de seu centro. Os autores desse trabalho também propõem uma formulação matemática para o problema e conseguem resolvê-lo através de Programação Linear Binária, tendo como entrada a quantidade de agregadores que se deseja utilizar [Souza, Gustavo B. de C. et al. 2013].

O trabalho de Leon [Leon 2011] desenvolve um guia de boas práticas para o planejamento de uma infraestrutura de medição avançada que utiliza redes em malha e dispositivos que operam na frequência de 902-928 MHz. O autor utiliza a ferramenta EDX SignalPro [EDX Wireless 2014] para validar suas propostas em uma amostra de vizinhança que contém 40 mil medidores. Contudo, o autor não teve como objetivo obter o melhor posicionamento de agregadores.

A grande desvantagem dos trabalhos citados anteriormente está na necessidade de se indicar previamente o número de agregadores que devem ser posicionados. Descobrir a menor quantidade de agregadores necessária e suas posições não é uma tarefa trivial. O método proposto neste trabalho difere-se dos citados acima pois obtém a menor quantidade necessária de agregadores além de suas respectivas posições. Para isso, o problema de planejamento de uma AMI é adaptado ao *Set Covering Problem*. O problema também é adaptável a problemas similares conhecidos como *Facility Location Problems* [Farahani et al. 2012].

Os autores deste artigo, em um trabalho anterior, apresentaram uma ferramenta para planejamento de *smart grids* [Rolim et al. 2014]. Descrevem-se as funcionalidades e a interface gráfica dessa ferramenta. No entanto, o problema da alocação automática de agregadores é tratado como uma caixa-preta. Um vídeo de demonstração desta ferramenta foi vencedor da competição de estudantes da SmartGridComm 2014 [Rolim 2014].

## 4. Adaptação do *Set Covering Problem*

Esta seção detalha o *Set Covering Problem* e discute como o planejamento automático de agregadores em *smart grids* pode ser adaptado a este problema.

### 4.1. Formulação Matemática do SCP

O SCP clássico é descrito da seguinte forma: dado um conjunto  $M$  de tamanho  $m$  e  $n$  subconjuntos  $S_j \subseteq M$ , onde  $j \in N = 1, \dots, n$  cada um contendo um custo não negativo  $c_j$ , o objetivo é minimizar o custo de subconjuntos  $S_j$  de tal forma que cada elemento de  $M$  pertença a pelo menos um destes subconjuntos. Uma formulação matemática deste problema comum na literatura é descrita como:

$$\min \sum_{j=1}^n c_j \cdot x_j \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_{j \in N} a_{ij} x_j \geq 1, i \in M \quad (2)$$

$$x_j \in \{0, 1\}, j \in N. \quad (3)$$

A variável  $x_j$  é igual a 1 se o subconjunto  $S_j$  pertence à solução e 0 caso contrário. O coeficiente  $a_{ij}$  é 1 se o elemento  $i$  pertence a  $S_j$  e 0 caso contrário. A matriz  $A = (a_{ij})$ ,  $i = 1, \dots, m$ ,  $j = 1, \dots, n$  é chamada de matriz de cobertura. Na matriz de cobertura cada linha representa um elemento a ser coberto e cada coluna um subconjunto. A Restrição (1) garante que todos os elementos do conjunto  $M$  serão cobertos por pelo menos um subconjunto. A função de minimização consta com a variável  $c_j$  que indica o custo de escolha de um determinado subconjunto. Este trabalho aborda apenas a variante do SCP de custo único, introduzida por [Toregas et al. 1971]. Por este motivo, a variável  $c_j$  pode ser ignorada, visto que, o custo de escolha de cada subconjunto é idêntico e não influencia na função de minimização.

A Figura 2 ilustra uma matriz de cobertura do SCP. De forma simples, o objetivo é selecionar o menor número de colunas possível de forma que todas as linhas sejam cobertas. Uma linha  $L$  é coberta por uma coluna  $C$  se o par  $(L, C)$  for representado pelo valor 1. Note que para este exemplo, as Colunas 0, 1 e 2 cobrem todas as linhas do problema, logo constituem uma solução válida. No entanto, o objetivo do SCP é minimizar o número de conjuntos na solução. As Colunas 0 e 3 compõem o menor número de colunas possível para que todas as linhas sejam cobertas constituindo a solução ótima para o exemplo apresentado.

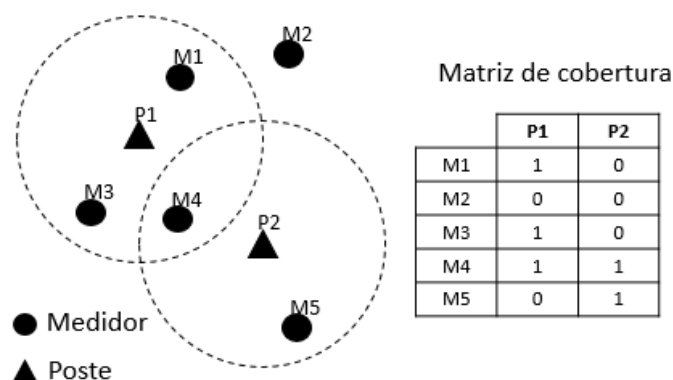
	0	1	2	3
0	1	0	0	0
1	0	1	0	1
2	0	0	1	1

**Figura 2. Uma matriz de cobertura do Set Covering Problem.**

#### 4.2. O Problema de Planejamento de Agregadores como um SCP

O objetivo do SCP é determinar a menor quantidade de subconjuntos que contêm todos os elementos que devem ser cobertos. Para o planejamento de uma *smart grid*, os elementos a serem cobertos são os medidores e os subconjuntos são formados pelos medidores que serão cobertos se um agregador for adicionado à determinada posição geográfica. Para facilitar o entendimento, essas posições são consideradas como postes elétricos. Como no exemplo da Figura 2, os medidores podem ser identificados pelas linhas e os postes pelas colunas. Ao se determinar a menor quantidade de colunas necessárias, é possível saber em quais postes os agregadores devem ser instalados para que toda a rede seja coberta.

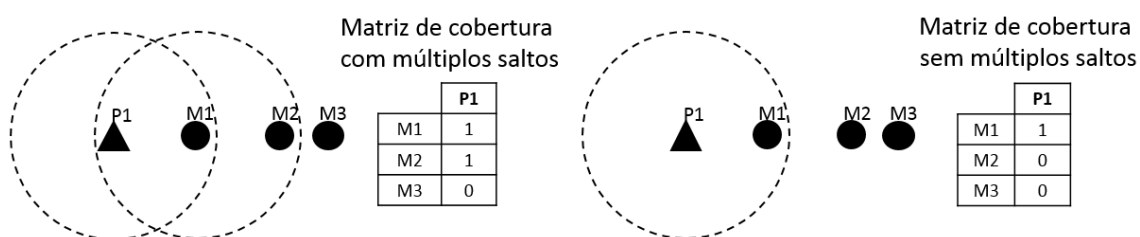
Para que a matriz de cobertura possa ser criada, é preciso obter as posições geográficas dos medidores e dos postes. Através destas posições e do alcance dos agregadores, é possível determinar quais agregadores alcançam quais medidores, uma vez que os agregadores são instalados nos postes. Para todos os agregadores é verificado quais medidores estão a uma distância menor ou igual ao alcance. Os que obedecem esta condição são representados por 1, caso contrário, por 0. A Figura 3 exemplifica este processo. Nela, os raios de cobertura são representados por circunferências tracejadas, os medidores por círculos e os postes por triângulos. A matriz de cobertura resultante também é exibida. Note que os medidores dentro da área de cobertura de um agregador são identificados pelo número 1, e os que estão fora por 0.



**Figura 3. Criação da matriz de cobertura pela posição de medidores e agregadores.**

Durante esta fase, o alcance dos agregadores é imutável e não considera obstáculos do meio. Por este motivo, é recomendado que este alcance seja obtido através de um modelo de propagação sem visada direta como, por exemplo, o Okumura-Hata [Hatay 1980].

De forma análoga, é possível construir a matriz de cobertura considerando múltiplos saltos. Medidores poderão atuar como nós intermediários, permitindo o alcance de dispositivos que antes seria impossível. Dado um poste e o conjunto de medidores alcançáveis a um salto, é considerado que este poste também alcança os vizinhos deste conjunto. O número máximo de saltos é variável. A Figura 4 exibe a matriz de cobertura da técnica com 2 saltos e com apenas 1 salto. Utilizando dois saltos, o medidor M1 é capaz de alcançar seu vizinho M2. Portanto, considera-se que o agregador P1 cobre M2 utilizando dois saltos.



**Figura 4. Comparação da matriz de cobertura com e sem múltiplos saltos.**

### 4.3. Construção da Matriz de Cobertura por Grade

O tempo de construção da matriz de cobertura está intimamente ligado à dimensão da região na qual postes e medidores estão instalados. Isto acontece pois cada poste deve ser analisado independentemente, verificando quais medidores um agregador que venha a ser instalado neste poste será capaz de cobrir. Contudo, verificar todos os medidores é desnecessário, visto que, dependendo da tecnologia de rede empregada é pouco provável que medidores muito distantes estarão dentro do alcance desse agregador. Esse problema se agrava à medida que a região analisada e a quantidade de medidores aumenta. Para evitar comparações desnecessárias, a adaptação proposta neste trabalho organiza medidores e postes em uma grade, que os divide em células de acordo com suas posições geográficas.

Uma grade é composta por várias células com tamanhos fixos. Durante a criação da matriz de cobertura, o poste analisado só verificará a conectividade de medidores que pertencem à sua célula e às células vizinhas. A Figura 5 exibe um exemplo de grade e a região que deve ser analisada mediante à escolha de uma célula. Os postes são representados por triângulos e os medidores por círculos preenchidos. A verificação das células vizinhas evita que um poste esteja no limite de uma célula e não analise um medidor alcançável que pertença a outra célula. Note que o poste da célula referência alcança um medidor da célula superior. É importante notar que caso o tamanho da célula seja muito maior que o alcance de um poste, maior será a quantidade de medidores analisados desnecessariamente. No pior caso, a grade contém uma única célula que engloba todos os postes e medidores. Consequentemente, para a grade com uma única célula, a quantidade de medidores analisados desnecessariamente será máxima, retornando ao problema original. Por exemplo, em uma região com 29002 medidores e 12140 postes e alcance de 50 m, a matriz de cobertura é criada em 2.6 s considerando uma grade de células de aproximadamente  $100 \times 100 \text{ m}^2$  e sem o uso da grade a criação demora 82,6 s. Neste cenário, o uso da grade acelerou o processo em aproximadamente 32 vezes.

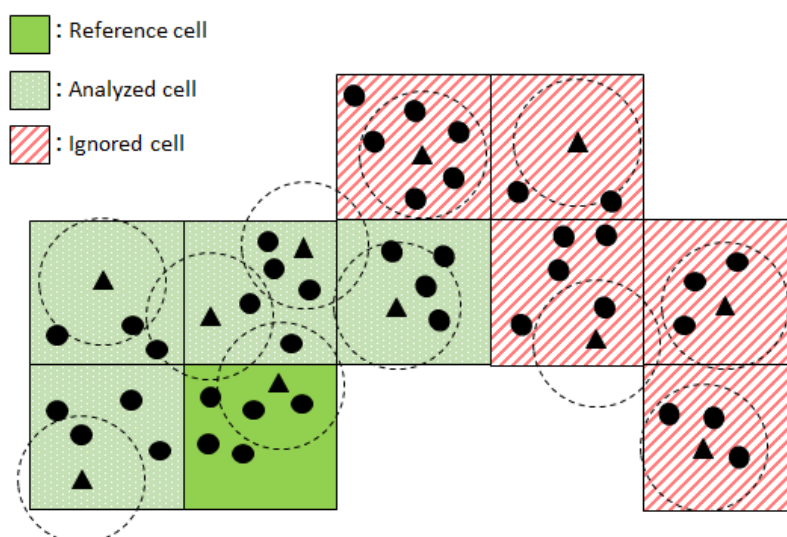


Figura 5. Uma grade e a região de alcance de uma célula.

Por outro lado, o tamanho da grade não pode ser menor que o alcance do agregador. Caso seja, há chance de um agregador em um dado poste alcançar um medidor de uma região não vizinha e consequentemente construir a matriz de cobertura incorretamente.

## 5. A Heurística Proposta

Duas abordagens podem ser utilizadas para resolver o SCP. A primeira envolve o uso de um *solver* de programação linear inteira, como por exemplo, o CPLEX [IBM 2009] e o GLPK [Makhorin 2008]. Esses métodos retornam as soluções exatas, mas ocupam grande quantidade de memória e exigem grande capacidade de processamento. Dependendo do tamanho e da complexidade do problema, a utilização de um *solver* é inviável. A segunda abordagem é utilizar uma heurística. As heurísticas não garantem que a solução

ótima será encontrada, mas são capazes de obter bons resultados utilizando menos recursos computacionais e em intervalos de tempo relativamente curtos.

O SCP modelado para o planejamento de agregadores em *smart grids* obedece um padrão geográfico, isto é, os medidores alcançáveis por um poste estão limitados a uma região ao redor deste. É improvável, por exemplo, que um poste alcance medidores muito distantes mas não alcance medidores que estejam próximos. Os *solvers* baseiam-se em características do problema para definir uma série de restrições, limitando o conjunto solução e, com isso, obtendo o resultado ótimo através de tentativas. Não cabe a este trabalho explicar o funcionamento de um *solver*. O problema formado a partir das características mencionadas são as mesmas de um SCP do tipo euclidiano. [Yelbay et al. 2012] detalham que SCPs do tipo euclidiano são de fácil resolução e que o avanço dos *solvers* ao longo dos anos permitiu que estas instâncias fossem resolvidas rapidamente. De fato, essa característica pode ser observada através do seguinte experimento computacional. A biblioteca online OR-Library [Beasley 1990] disponibiliza, para testes, inúmeras instâncias para diferentes problemas de otimização. A menor instância não euclidiana disponibilizada com 200 elementos (medidores) e 1000 subconjuntos (postes) foi submetida ao *solver* GLPK. Em 9 horas de execução a solução ainda não tinha sido descoberta. Uma instância de um cenário de *smart grid* (euclidiana), com posições de postes reais disponibilizadas pela Celesc (Centrais Elétricas de Santa Catarina), tendo 9997 medidores, 750 postes e agregadores com alcance máximo de 50 metros submetida ao mesmo *solver* foi resolvida em 1,9 s, desconsiderando o tempo de alocação de memória.

As características particulares do SCP formulado a partir de cenários de *smart grids*, portanto, podem ser processadas em intervalos curtos de tempo pelos *solvers* em virtude da disposição geográfica e do alcance limitado dos agregadores. No entanto, a quantidade de memória necessária e o tempo de alocação dessa quantidade de memória crescem conforme a dimensão do problema. Para instâncias grandes, é inútil se ter alta capacidade de processamento se a alta exigência de memória inviabiliza sua execução.

A heurística proposta aproveita-se das características apresentadas acima e do uso de grades para a construção da matriz. O problema é dividido em partes menores, que serão aplicadas ao método exato independentemente. Para cada célula forma-se um SCP a partir dos medidores desta célula e de postes desta e das células vizinhas. Os postes das células vizinhas são utilizados para se aumentar o grau de escolhas durante a execução do método exato. A união das soluções de todas as células compõe a solução para o problema inicial. Contudo, um mesmo poste pode fazer parte da solução de mais de uma célula. Por este motivo, caso a solução final contenha postes repetidos, considera-se que um único agregador deverá ser instalado nestes postes. A Figura 6 exibe o procedimento de divisão da heurística. O problema inicial indicado por P1 é aplicado a uma grade G, para cada célula desta grade forma-se um subproblema com os medidores e postes de uma célula acrescido dos postes de células vizinhas. A célula C1 gera o subproblema S1, a C2 gera o subproblema S2 e a C3 gera o subproblema S3. Cada subproblema é aplicado ao método exato. A união dos resultados de S1, S2 e S3 compõe a solução do problema P1.



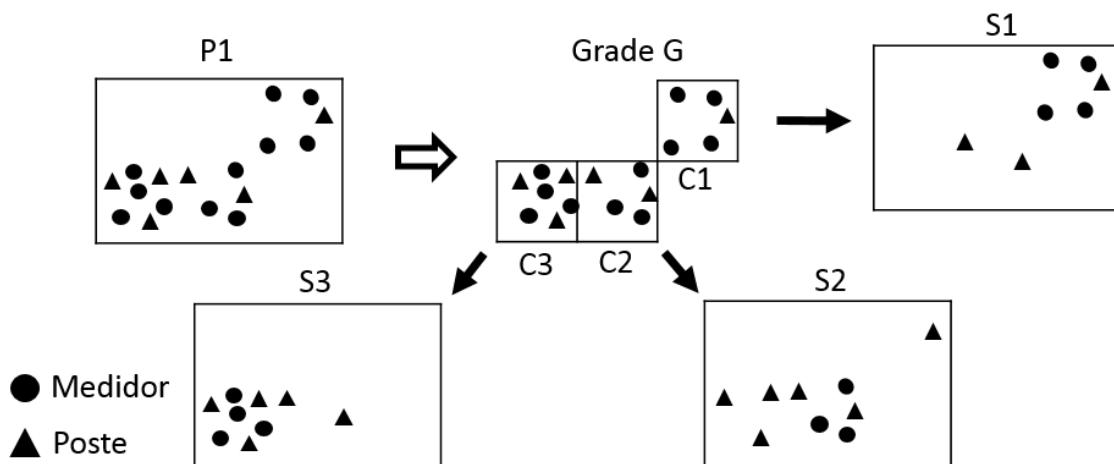


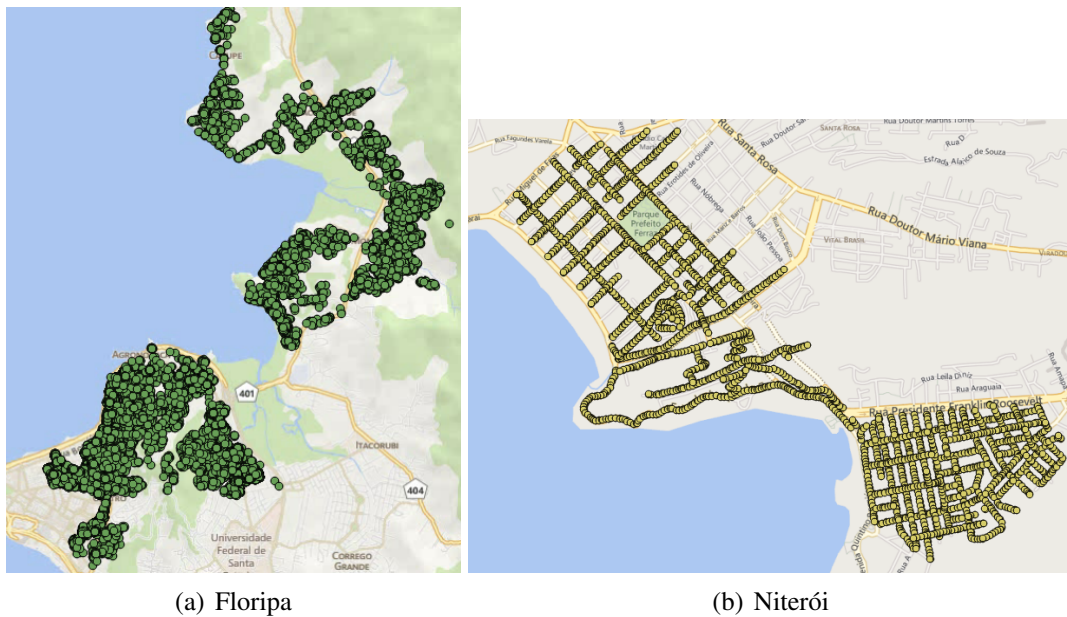
Figura 6. Processo de divisão da heurística proposta.

## 6. Resultados

### 6.1. Desempenho

O primeiro objetivo da avaliação é comparar o desempenho da heurística proposta com o do método exato baseado em programação linear inteira implementado pelo *solver* GLPK quanto ao tempo de execução, qualidade da solução (quantidade de agregadores utilizados) e exigência de memória. O objetivo do SCP é obter o menor número de agregadores necessário para se cobrir toda a vizinhança. Todos os métodos foram executados em uma única *thread* em um Intel Core i5 de 3 GHz com 8 GB de memória RAM no sistema operacional Windows 8.1. A primeira instância a ser analisada foi criada a partir de posições geográficas reais de postes de bairros da cidade de Florianópolis disponibilizados pela Celesc. Essa instância contém ao total 12140 postes e 29002 medidores distribuídos ao redor destes e é chamada de Floripa. A Figura 7(a) exibe esta região. A segunda instância foi gerada manualmente baseando-se nas posições de ruas e casas dos bairros de Icaraí e São Francisco na cidade de Niterói. Medidores foram distribuídos ao longo das ruas espaçados uns dos outros de 15 a 25 m, aproximadamente. A distância entre postes é de 30 a 50 metros aproximadamente. O intuito dessa forma de distribuição usada na segunda instância, chamada de Niterói, é simular uma possível distribuição de medidores e postes para analisar como o planejamento se comporta. As posições utilizadas não são reais. A Figura 7(b) mostra esta região.

Para aumentar e diversificar a avaliação, as instâncias Floripa e Niterói são divididas em sub-instâncias. A instância Floripa foi dividida em 8 sub-instâncias de forma aditiva. Por exemplo, a segunda instância é composta pela primeira acrescida de novos medidores e postes da instância original, a terceira engloba a segunda e assim sucessivamente, até que a oitava sub-instância é, na verdade, a instância completa, contendo os 12140 postes e 29002 medidores. A instância Niterói foi dividida em duas sub-instâncias, a primeira contendo apenas um bairro e a segunda ambos. A Tabela 1 compara o tempo de execução total do método proposto, chamado de *Grid Planning* com diferentes dimensões de célula. A sigla GP significa *Grid Planning* e o número à direita a dimensão da célula. Por exemplo, GP 100 utiliza células de 100x100 m<sup>2</sup>. O caso particular GP 10000 foi utilizado propositalmente para que contenha apenas uma única célula, representando a



**Figura 7. Disposição dos medidores para as instâncias Floripa e Niterói.**

solução ótima. O GLPK foi escolhido como *solver* que será utilizado em cada célula. As sub-instâncias são identificadas pelo nome da instância a qual foi derivada seguido de sua dimensão (medidores x postes). O alcance de um agregador foi definido por 50 m e que medidores devem se conectar diretamente aos agregadores. T.E indica o tempo de execução em segundos. Q.S é a qualidade da solução dada em número de agregadores com o valor de *gap* (distância da melhor solução encontrada) entre parênteses. A sigla M.M.A indica a quantidade máxima de memória RAM alocada em megabytes.

Com dimensões maiores de célula, o método proposto possui maior informação da vizinhança como um todo e, conseqüentemente, é capaz de gerar melhores soluções. Por outro lado, o tamanho da célula está associado à quantidade de memória exigida e ao tempo de execução. Conforme mencionado, no caso do GP 10000, essa dimensão é tão extensa que a grade é composta por apenas uma célula, sendo equivalente ao método exato. Essa característica também pode ser observada em instâncias menores. Nas sub-instâncias Floripa com 1000, 2000 e 3000 medidores, o GP 1000 obteve resultados idênticos ao GP 10000, indicando que para estas sub-instâncias, uma única célula de 1000x1000 m<sup>2</sup> englobou todos os elementos.

Para a instância Floripa completa, o GP 10000 não foi capaz de obter o resultado, estourando a capacidade máxima de 8 GB de RAM. Essa mesma instância foi submetida a outro computador com 16 GB de RAM, com o intuito de se determinar o limite de memória exigido. Os 16 GB também foram esgotados.

Em contra partida, o GP 100 teve as piores qualidades de solução, apesar de exigir menos quantidade de memória e obter os menores tempos de execução (desconsiderando a primeira e segunda instâncias). O pior dos casos acontece na instância Floripa completa, onde o GP 100 selecionou 1380 postes contra os 955 (não exato) obtidos pelo GP 1000, caracterizando um *gap* de 45%.

**Tabela 1. Comparação de desempenho entre os métodos.**

Instância		GP 100	GP 550	GP 1000	GP 10000 (ótimo)
Floripa(1000x72)	T.E(s)	0,46	0,32	0,30	<b>0,29</b>
	Q.S(nº DAPs)	37 (42%)	27(4%)	<b>26(0%)</b>	<b>26(0%)</b>
	M.M.A(MB)	<b>1,00</b>	10,10	12,80	12,80
Floripa(2000x138)	T.E(s)	<b>0,92</b>	1,12	1,20	1,17
	Q.S(nº DAPs)	67(40%)	<b>48(0%)</b>	<b>48(0%)</b>	<b>48(0%)</b>
	M.M.A(MB)	<b>1,50</b>	18,50	45,90	45,90
Floripa(3000x209)	T.E(s)	<b>1,00</b>	2,20	2,52	2,57
	Q.S(nº DAPs)	97(31%)	76(3%)	<b>74(0%)</b>	<b>74(0%)</b>
	M.M.A(MB)	<b>1,60</b>	26,20	66,00	101,50
Floripa(4000x274)	T.E(s)	<b>1,76</b>	3,16	4,30	4,63
	Q.S(nº DAPs)	138(28%)	114(6%)	111(3%)	<b>107(0%)</b>
	M.M.A(MB)	<b>1,60</b>	44,50	93,00	174,00
Floripa(5000x354)	T.E(s)	<b>2,46</b>	4,32	6,80	7,04
	Q.S(nº DAPs)	181(32%)	147(7%)	144(5%)	<b>137(0%)</b>
	M.M.A(MB)	<b>1,20</b>	46,79	141,00	278,10
Floripa(10000x750)	T.E(s)	<b>5,5</b>	9,28	21,14	31,56
	Q.S(nº DAPs)	399(28%)	339(9%)	329(6%)	<b>311(0%)</b>
	M.M.A(MB)	<b>2,20</b>	48,50	220,20	1167,90
Floripa(15000x1872)	T.E(s)	<b>12,53</b>	20,50	45,91	158,32
	Q.S(nº DAPs)	846(26%)	714(7%)	691(3%)	<b>670(0%)</b>
	M.M.A(MB)	<b>3,30</b>	91,69	407,50	4340,00
Floripa(29002x12140)	T.E(s)	<b>43,00</b>	168,00	739,88	*
	Q.S(nº DAPs)	1380(45%)	1004(5%)	<b>955(0%)</b>	*
	M.M.A(MB)	<b>22,00</b>	1386,00	5322,10	*
Niterói(1576x453)	T.E(s)	<b>1,67</b>	2,54	2,8	2,94
	Q.S(nº DAPs)	155(44%)	120(11%)	109(1%)	108(0%)
	M.M.A(MB)	<b>0,70</b>	27,60	102,70	113,50
Niterói(3666x1030)	T.E(s)	<b>4,65</b>	5,95	9,89	15,43
	Q.S(nº DAPs)	409(46%)	304(9%)	280(0%)	280(0%)
	M.M.A(MB)	<b>0,70</b>	28,90	143,70	588,30

\*O método não foi capaz de obter um resultado por falta de memória.

As mesmas instâncias foram submetidas a testes utilizando a técnica de múltiplos saltos, descrita na Seção 4. A Tabela 2 exibe os resultados assumindo o valor limite de 4 saltos. Os resultados mostram que o uso de múltiplos saltos reduz o número de agregadores exigidos para cobrir uma dada região. Para a instância completa Floripa, ocorre uma queda de 955 para 299 postes selecionados, o que significa uma redução de 656 agregadores nesta região. O uso de múltiplos saltos dificulta o problema, aumentando o tempo de execução dos métodos, contudo, pouco influencia na quantidade de memória necessária. Essa característica é evidente na instância Niterói(3666x1030), que sem múltiplos saltos demorou 15,43 s e utilizou 588,30 MB de memória, enquanto que com múltiplos saltos demorou aproximadamente 12 vezes mais tempo para ser resolvida, sendo que a quantidade máxima de memória subiu em apenas 16,6 MB. O limite de saltos deve ser ajustado conforme as características da região. Cenários urbanos, por exemplo, possuem inúmeras fontes de ruído e interferência, portanto diminuir a quantidade de saltos aparenta ser uma boa decisão. Opostamente, a livre propagação do sinal em campos rurais permite que o número de saltos seja maior.

## 6.2. Aumento de Cobertura pela Técnica de Múltiplos Saltos

Conforme exemplificado na Seção 4, durante a criação da matriz de cobertura de uma região, é possível que alguns medidores não sejam alcançáveis por estarem muito distantes de qualquer poste. Por isso, uma solução é empregar redes de múltiplos saltos.

**Tabela 2. Comparação de desempenho entre os métodos com até 4 saltos.**

Instância		GP 100	GP 550	GP 1000	GP 10000 (ótimo)
Floripa(1000x72)	T.E(s)	<b>0,58</b>	0,75	0,83	0,82
	Q.S(nº DAPs)	18 (200%)	7(16%)	<b>6(0%)</b>	<b>6(0%)</b>
	M.M.A(MB)	<b>1,10</b>	11,7	15,00	15,00
Floripa(2000x138)	T.E(s)	<b>1,27</b>	2,44	3,18	3,05
	Q.S(nº DAPs)	38(171%)	17(21%)	<b>14(0%)</b>	<b>14(0%)</b>
	M.M.A(MB)	<b>1,60</b>	19,80	51,00	51,00
Floripa(3000x209)	T.E(s)	<b>1,91</b>	3,99	4,82	6,12
	Q.S(nº DAPs)	60(200%)	23(15%)	23(15%)	<b>20(0%)</b>
	M.M.A(MB)	<b>1,80</b>	27,9	69,60	110,10
Floripa(4000x274)	T.E(s)	<b>2,70</b>	5,29	7,29	9,77
	Q.S(nº DAPs)	92(178%)	46(39%)	40(21%)	<b>33(0%)</b>
	M.M.A(MB)	<b>1,70</b>	48,70	100,30	185,10
Floripa(5000x354)	T.E(s)	<b>3,31</b>	6,92	10,81	14,65
	Q.S(nº DAPs)	117(179%)	55(31%)	48(14%)	<b>42(0%)</b>
	M.M.A(MB)	<b>1,60</b>	50,20	148,90	290,60
Floripa(10000x750)	T.E(s)	<b>7,34</b>	15,22	29,22	58,58
	Q.S(nº DAPs)	271(130%)	154(31%)	131(11%)	<b>118(0%)</b>
	M.M.A(MB)	<b>2,60</b>	51,90	228,50	1188,40
Floripa(15000x1872)	T.E(s)	<b>15,36</b>	31,19	60,51	272,77
	Q.S(nº DAPs)	602(92%)	383(22%)	347(10%)	<b>313(0%)</b>
	M.M.A(MB)	<b>4,50</b>	98,30	423,70	4384,50
Floripa(29002x12140)	T.E(s)	<b>104,73</b>	492,88	985,89	*
	Q.S(nº DAPs)	803(169%)	342(14%)	<b>299(0%)</b>	*
	M.M.A(MB)	<b>28,00</b>	1566,90	5726,60	*
Niterói(1576x453)	T.E(s)	<b>2,13</b>	3,25	4,85	4,55
	Q.S(nº DAPs)	82(412%)	22(38%)	18(13%)	<b>16(0%)</b>
	M.M.A(MB)	<b>0,80</b>	30,0	111,50	123,20
Niterói(3666x1030)	T.E(s)	<b>4,94</b>	6,86	11,85	184,07
	Q.S(nº DAPs)	234(350%)	70(35%)	59(13%)	<b>52(0%)</b>
	M.M.A(MB)	<b>0,80</b>	30,7	152,19	604,90

\*O método não foi capaz de obter um resultado por falta de memória.

Para avaliar o emprego dessa solução, o segundo objetivo é comparar a quantidade de medidores alcançáveis ao se variar a quantidade máxima de saltos permitida quando se emprega a solução com múltiplos saltos. O alcance foi reduzido a 10 metros para que o número de medidores não alcançáveis seja mais evidente. O número de saltos variou de 1 (sem múltiplos saltos) a 6 saltos. A Tabela 3 exibe os resultados obtidos. Notavelmente o uso de múltiplos saltos aumenta a cobertura de uma rede, sobretudo nas sub-instâncias Floripa.

**Tabela 3. Relação de medidores não alcançáveis e número de saltos máximo.**

Instância	Número máximo de saltos					
	1	2	3	4	5	6
Floripa(1000x72)	164	8	7	7	7	7
Floripa(2000x138)	363	15	15	15	15	15
Floripa(3000x209)	526	28	28	28	28	28
Floripa(4000x274)	728	26	23	23	23	23
Floripa(5000x354)	882	42	40	40	40	40
Floripa(10000x750)	1809	93	82	81	81	81
Floripa(15000x1872)	2548	216	210	210	210	210
Floripa(29002x12140)	3201	502	486	486	486	486
Niterói(1576x453)	522	464	457	456	456	456
Niterói(3666x1030)	1299	1166	1147	1146	1146	1146

## 7. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho adaptou o problema de planejamento em redes elétricas inteligentes para um problema conhecido na literatura e propôs um método para resolvê-lo. Embora o *Set Covering Problem* seja NP-Completo, as informações de cobertura sob a qual foi montado baseiam-se nas posições geográficas de medidores e postes e do alcance máximo de um agregador. Essa característica também permitiu a separação de elementos em células, utilizadas para reduzir o tempo necessário de criação da matriz de cobertura. Adicionalmente, as células fazem parte da heurística proposta, delimitando regiões que serão planejadas independentemente, permitindo a resolução de grandes instâncias. Os resultados mostram que solucionar cada célula independentemente reduz a quantidade de memória necessária e o tempo de execução. No entanto, o tamanho das células impacta diretamente no resultado, de forma que a qualidade da solução, tempo de processamento e quantidade de memória aumentam de acordo com a dimensão de uma célula.

As soluções apresentadas têm por objetivo determinar a menor quantidade possível de agregadores para cobrir uma região. Contudo, o valor de alcance de um agregador deve ser condizente com o cenário em que os agregadores serão instalados. Caso o alcance seja muito otimista, o número de agregadores obtido pela solução será menor que o de fato se precisa para cobrir a região. Caso o alcance seja muito pessimista, a solução conterá agregadores redundantes. Como trabalho futuro propõe-se que este alcance seja obtido por um modelo de propagação sem visada direta que considere aspectos da região a ser planejada como urbano, suburbano e rural [CEPT Administrations 2000]. Também propõe-se realizar aprimoramentos na heurística apresentada, aplicando métodos de busca local no resultado final. Futuramente, as soluções obtidas serão validadas sobre simulações no NS3.

## Agradecimentos

Este trabalho é apoiado em parte por CNPq, CAPES, FAPERJ, TBE/ANEEL e Celesc/ANEEL.

## Referências

- Beasley, J. E. (1990). OR-Library: distributing test problems by electronic mail. *Journal of the operational research society*, pags. 1069–1072.
- CEPT Administrations (2000). Monte-carlo simulation methodology for the use in sharing and compatibility studies between different radio services or systems. *ERC within the CEPT*.
- EDX Wireless (2014). EDX SignalPro v8.2. <http://edx.com/products/edx-signalpro/>.
- Farahani, R. Z., Asgari, N., Heidari, N., Hosseini, M., e Goh, M. (2012). Covering problems in facility location: A review. *Computers & Industrial Engineering*, 62(1):368–407.
- Guimarães, P. H. V., Murillo, A., Andreoni, M., Mattos, D. M. F., Ferraz, L. H. G., Pinto, F. A. V., Costa, L. H. M. K., e Duarte, O. C. M. B. (2013). Comunicação em redes elétricas inteligentes: Eficiência, confiabilidade, segurança e escalabilidade. *Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - SBRC 2013*, pags. 101–165.

- Hatay, M. (1980). Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 29(3):317–325.
- IBM (2009). CPLEX optimizer: High-performance mathematical programming solver for linear programming, mixed integer programming, and quadratic programming.
- Karp, R. M. (1972). *Reducibility among combinatorial problems*. Springer.
- Leon, G. (2011). Smart planning for smart grid AMI mesh networks. Relatório técnico, EDX Wireless.
- Makhorin, A. (2008). GLPK (GNU linear programming kit).
- Okabayashi, V. H. (2014). Seleção dinâmica de gateway para redes elétrica inteligentes. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense.
- Rolim, G. (2014). Vídeo *A Network Planning System for Smart Grid* vencedor da competição de estudantes do SmartGridComm 2014. <http://sgc2014.ieee-smartgridcomm.org/student-competition>.
- Rolim, G., Albuquerque, C., Moraes, I., Bettiol, A., Carniato, A., Passos, L. F., Homma, R. Z., e Molina, F. H. (2014). Sistema de Posicionamento de Agregadores de Dados em Redes Elétricas Inteligentes. Aceito para publicação em XIII ERIAC - Décimo Terceiro Encontro Regional Iberoamericano do Cigré.
- Souza, G., Vieira, F., Lima, C., Junior, G., Castro, M., e Araujo, S. (2013). Optimal positioning of GPRS concentrators for minimizing node hops in smart grids considering routing in mesh networks. Em *IEEE PES Conference On Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA)*, pags. 1–7.
- Souza, Gustavo B. de C., Viera, F. H. T., Cardoso, A. A., Lima, C. R., de Deus Júnior, G. A., de Castro, M. S., e de Araújo, S. G. (2013). Utilização de programação linear inteira para posicionamento de concentradores GPRS em redes smart grid. *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, pags. 1–6.
- Toregas, C., Swain, R., ReVelle, C., e Bergman, L. (1971). The location of emergency service facilities. *Operations Research*, 19(6):1363–1373.
- Wenpeng, L. (2009). Advanced metering infrastructure. *Southern Power System Technology*, 3(2):6–10.
- Yelbay, B., Birbil, Ş. İ., e Bülbül, K. (2012). The set covering problem revisited: an empirical study of the value of dual information. *Optimization Online*.