



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA



João Pedro Vidal Santos

**LOCALIZAÇÃO DE AGREGADORES DE DADOS EM REDES ELÉTRICAS  
INTELIGENTES**

**VOLUME 1**

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, ramo de Telecomunicações orientada pelo Professor Doutor Carlos Henggeler Antunes e coorientadora Professora Doutora Teresa Gomes

Fevereiro de 2019

## Agradecimentos

A realização deste trabalho representa a conclusão de uma etapa da minha vida, repleta de aprendizagens e momentos felizes, marcados pelos contributos de várias pessoas indispensáveis neste percurso. Neste sentido, manifesto o meu profundo sentimento de gratidão:

Ao Professor Doutor Carlos Alberto Henggeler de Carvalho Antunes, orientador da dissertação, e à Professora Doutora Teresa Martinez dos Santos Gomes, coorientadora da dissertação, pelo caminho que me ajudaram a percorrer, por todas as sugestões, conhecimentos transmitidos, por toda a disponibilidade e por serem para mim uma referência de empenho e dedicação.

A todos os Professores que fizeram parte da minha formação até aqui, por todo o conhecimento transmitido e por contribuírem para o crescimento pessoal.

Aos meus pais e irmãos, por fazerem de mim aquilo que sou hoje, pelos valores que me transmitiram, por toda a dedicação, pelo esforço enorme que fizeram para que eu pudesse continuar a minha formação, por acreditarem em mim, mesmo quando eu próprio duvidava e por todo o amor.

À minha namorada, por estar sempre ao meu lado ao longo deste percurso, por ser também para mim um exemplo de dedicação e de fé, por me ajudar a acreditar, por todo o amor, por viver de uma forma muito intensa todas as minhas conquistas e angústias e por ser essencial na minha vida.

À minha família, pelo carinho, por sempre acreditarem em mim e por me incentivarem constantemente a continuar.

À minha segunda família, Associação de Jovens de Soure e em especial ao Padre José Cunha, por serem para mim rosto de Deus, por serem fonte de alegria e uma parte muito importante na minha vida.

A todos os meus amigos, por desejarem sempre o melhor para mim e por compreenderem as minhas ausências nesta etapa da minha vida.

E porque “Quem a Deus tem nada lhe falta” (Santa Tereza D Avila), agradeço-Lhe pelo que sou hoje, por todas as alegrias e dificuldades, pela Sua Palavra e por estar sempre comigo.

Este trabalho foi financeiramente apoiado por fundos FEDER e fundos Nacionais através da FCT sob o projeto CENTRO-01-0145-FEDER-029312, e também apoiado pelos projetos ESGRIDS (POCI-01-0145-FEDER-016434) e MAnAGER (POCI-01-0145-FEDER- 028040).

## Resumo

As infraestruturas de medição avançadas (*Advanced Metering Infrastructure* - AMI) são um dos principais elementos das redes inteligentes (*Smart Grids*), permitindo a comunicação bidirecional entre os medidores inteligentes (*smart meters*) dos clientes e a concessionária da rede. A informação de medição proveniente dos clientes de uma região é concentrada em pontos intermédios, designados por agregadores. Os agregadores encaminham esta informação para o Sistema Central de Processamento (SCP), onde é processada. A localização dos agregadores é um dos maiores desafios no planeamento da *Smart Grid*, resultando, em geral, num problema NP-completo.

Nesta dissertação pretende-se determinar a localização ótima dos agregadores na *Smart Grid* e definir que ligações *smart meter* – agregador devem ser feitas, de forma a minimizar o custo total da rede (custo de instalação de cada agregador e custo da sua ligação aos *smart meters* e ao SCP).

Para a resolução deste problema são feitas duas abordagens diferentes baseadas em modelos de programação matemática – uma abordagem exata e outra meta-heurística. Para a implementação da abordagem exata é utilizado o software *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*. A abordagem meta-heurística foi concretizada através da implementação de um Algoritmo Genético (AG), com recurso ao *Matlab*. A abordagem exata foi aplicada a sete cenários diferentes (modelos de A a G), enquanto a abordagem meta-heurística foi apenas utilizada para simular o cenário correspondente ao modelo A (com resultados não competitivos em relação aos ótimos dados pelo *CPLEX*).

## Palavras Chave

Agregador, *Smart Grid*, *Advanced Metering Infrastructure*, Algoritmo Genético, *CPLEX*

## Abstract

Advanced Metering Infrastructure (AMI) is one of the key elements of the Smart Grid, allowing bidirectional communication between customers' smart meters and the power grid operator. Measurement information from customers in a region is concentrated in intermediate points called aggregators. The aggregators forward this information to the Central Processing System (SCP), where it is processed. The location of the aggregators is a relevant challenge in Smart Grid planning, generally resulting, in an NP-complete problem.

This dissertation aims to develop models and use methodological approaches to determine the best location for the aggregators in the Smart Grid and to define which smart meter-aggregator connections should be done in order to minimize the total network cost (installation cost of each aggregator and the cost of its connection to the smart meters and the SCP).

To solve this problem, two different approaches based on mathematical programming models were used: an exact approach and a meta-heuristic approach. IBM ILOG CPLEX Optimization Studio software was used for implementing and solving the exact approach. The meta-heuristic approach was carried out through the implementation of a Genetic Algorithm (GA), using Matlab. The exact approach was applied to seven different scenarios (models A to G), while the meta-heuristic approach was only used to simulate the scenario corresponding to model A (with uncompetitive results in relation to the optimum given by the CPLEX).

## Keywords

*Aggregator, Smart Grids, Advanced Metering Infrastructure, Genetic Algorithm, CPLEX*

## Índice

Resumo .....	iv
Abstract .....	v
Índice de Figuras:.....	vii
Índice de Tabelas: .....	ix
Lista de Siglas:.....	x
1. Introdução .....	1
2. Smart Grid.....	3
2.1. Conceito.....	3
2.2. Tecnologia de Medição.....	5
2.3. Arquitetura da <i>Smart Grid</i> .....	6
3. Problema de Localização .....	8
3.1 <i>Hub Location Problems</i> (HLB) .....	8
3.2 Problema da Localização de Agregadores na <i>Smart Grid</i> .....	9
3.3 Métodos de Resolução: .....	10
3.4 Alguns Estudos Sobre o Problema de Localização .....	11
3.4.1 Estudos sobre HLPs.....	11
3.4.2 Estudos sobre o problema de localização de agregadores na <i>Smart Grid</i> .....	12
4. Modelos:.....	13
5. Resultados experimentais .....	23
6. Algoritmo Genético .....	44
6.1. Algoritmo Genético Implementado.....	47
6.2. Resultados do Algoritmo Genético implementado .....	50
7. Conclusão .....	54
Referências .....	55
Anexo.....	57

## Índice de Figuras:

<i>Figura 1 - Áreas da Smart Grid, extraída de (Uluski, 2010)</i>	4
<i>Figura 2 - Esquema Ilustrativo de smart metering numa residência, extraída de (Santos, 2013)</i>	5
<i>Figura 3 - Áreas de comunicação na Smart Grid, extraída de (Souza, et al., 2016)</i>	6
<i>Figura 4 - Arquitetura das comunicações AMI na Smart Grid. Imagem adaptada de (Guo, Liang, &amp; Guo, 2016)</i>	7
<i>Figura 5 - conexão da WAN com a NAN, feita por agregador. Imagem extraída de (Hao, 2014)</i>	7
<i>Figura 6 - Resultados da experiência 1 com limitação de 1 hora para o solver (smart meters × locais)</i>	24
<i>Figura 7 - Resultados da experiência 2 com limitação de 1,5% de gap para o solver (smart meters × locais)</i>	26
<i>Figura 8 - Distribuição dos smart meters e dos locais potenciais para a instalação de agregadores, correspondente ao teste 1 de A/1000-100.</i>	28
<i>Figura 9 - Ligações estabelecidas entre smart meters e agregadores numa região selecionada da figura 3</i>	29
<i>Figura 10 - Ligações estabelecidas entre smart meters e agregadores no subproblema</i>	30
<i>Figura 11 - Ilustração da média e desvio padrão dos gaps de A/1000-100, A/2000-200, A/5000-400 e A/10000-450</i>	33
<i>Figura 12 - Ilustração da média e desvio padrão dos gaps de G/1000-100, G/2000-200, G/5000-400 e G/10000-450</i>	41
<i>Figura 13 - Médias e desvios padrão dos gaps das experiências do modelo A e do modelo G</i>	43
<i>Figura 14 - Fluxograma de um Algoritmo Genético</i>	44
<i>Figura 15 - Cruzamento com um ponto de corte (imagem adaptada de (Gaspar-Cunha, Antunes, &amp; Takahashi, 2012))</i>	46
<i>Figura 16 - Exemplo de um cromossoma de um indivíduo</i>	48
<i>Figura 17 - Variação da melhor solução alcançada pelo AG ao longo das 1000 gerações</i>	52
<i>Figura A1 - Distribuição dos smart meters e dos locais potenciais para a localização de agregadores, correspondente ao teste 1 de A/2000-200.</i>	57
<i>Figura A2-Distribuição dos smart meters e dos locais potenciais para a localização de agregadores, correspondente ao teste 1 de A/5000-400.</i>	57
<i>Figura A3 - Distribuição dos smart meters e dos locais potenciais para a localização de agregadores, correspondente ao teste 1 da A/10000-450.</i>	58
<i>Figura A4 - Distribuição dos agregadores e dos locais potenciais para a instalação de agregadores, correspondente ao teste 1 de G/1000-100.</i>	58
<i>Figura A5 - Distribuição dos agregadores e dos locais potenciais para a instalação de agregadores, correspondente ao teste 1 de G/2000-200.</i>	59

*Figura A6 - Distribuição dos agregadores e dos locais potenciais para a instalação de agregadores, correspondente ao teste 1 de G/5000-400.*\_\_\_\_\_ 59

*Figura A7 - Distribuição dos agregadores e dos locais potenciais para a instalação de agregadores, correspondente ao teste 1 de G/10000-450.*\_\_\_\_\_ 60

## Índice de Tabelas:

<i>Tabela 1 - Resultados da experiência 1 com limitação de 1 hora para o solver</i>	24
<i>Tabela 2 - Resultados da experiência 2 com limitação de 1,5% de gap para o solver</i>	26
<i>Tabela 3 - Resultados de A/1000-100 com limitação de 1 hora para o solver</i>	28
<i>Tabela 4 - Resultados da A/2000-200 com limitação de 1 hora para o solver</i>	31
<i>Tabela 5 - Resultados da A/5000-400 com limitação de 1 hora para o solver</i>	32
<i>Tabela 6 - Resultados da A/10000-450 com limitação de 1 hora para o solver</i>	32
<i>Tabela 7 - Resumo das dimensões do problema de A/1000-100, A/2000-200, A/5000-400 e A/10000-450</i>	33
<i>Tabela 8 - Resultados da C/2000-200 com limitação de 1 hora para o solver</i>	35
<i>Tabela 9 - Parâmetros de entrada das experiências D/2000-200, E/2000-200 e F/2000-200</i>	35
<i>Tabela 10 - Resultados da D/2000-200 com limitação de 1 hora para o solver</i>	36
<i>Tabela 11 - Resultados da E/2000-200 com limitação de 1 hora para o solver</i>	37
<i>Tabela 12 - Resultados da F/2000-200 com limitação de 1 hora para o solver</i>	38
<i>Tabela 13 - Resultados da G/1000-100 com limitação de 1 hora para o solver</i>	39
<i>Tabela 14 - Resultados da G/2000-200 com limitação de 1 hora para o solver</i>	40
<i>Tabela 15 - Resultados da G/5000-400 com limitação de 1 hora para o solver</i>	40
<i>Tabela 16 - Resultados da G/10000-450 com limitação de 1 hora para o solver</i>	41
<i>Tabela 17 - Descrição dos parâmetros de entrada do AG</i>	50
<i>Tabela 18 - Descrição dos parâmetros dos Operadores genéticos do AG</i>	51
<i>Tabela 19 - Resultados do Algoritmo Genético Implementado</i>	52

## Lista de Siglas:

- AG – Algoritmo Genético;
- AMI – Advanced Meter Infrastructure;
- AMR – Automatic Meter Reading;
- AN – Available Nodes;
- HAN – Home Area Network;
- HES – Head-End System;
- HLP – Hub Location Problem;
- IDE – Intelligent Electronic Device;
- NAN – Neighbor Area Network;
- PMU – Phasor Measurement Unit;
- PN – Potential Nodes;
- SA – Simulated Anneling;
- SCP – Sistema Central de Processamento;
- TS – Tabu Search;
- TIC – Tecnologias de Informação e Comunicação;
- WAN – Wide Area Network;

## 1. Introdução

Num mundo cada vez mais dependente de energia elétrica, é necessário melhorar a eficiência das redes, em particular da rede de distribuição. As *Smart Grids* são uma evolução das redes elétricas atuais, permitindo a comunicação de dados entre todos os atores do sistema: consumidores, comercializadores, operadores das redes de distribuição e transporte e geradores de energia elétrica. Esta capacidade de comunicação, permite que as empresas de rede tirem partido da informação enviada pelos consumidores para otimizarem as suas operações.

A leitura e armazenamento de informações detalhadas do consumo de energia elétrica de cada ponto de entrega é feito pelos *smart meters*, instalados junto aos locais de consumo. Os dados geridos pelos *smart meters* são periodicamente enviados a dispositivos agregadores (concentradores). Os agregadores são elementos de interligação entre os *smart meters* e o Sistema Central de Processamento (SCP), local onde a informação é processada. Os agregadores devem ter a capacidade para gerirem os fluxos de informação provenientes dos clientes e, posteriormente, enviá-los para o SCP. Assim, os *smart meters* e os agregadores fazem parte da infraestrutura de medição avançada (*Advanced Metering Infrastructure – AMI*).

Um dos problemas no desenho de AMI é a determinação dos locais de instalação de agregadores. A análise manual da melhor localização dos agregadores é dispendiosa e difícil de concretizar na prática, especialmente em zonas com elevada densidade populacional. Assim, o problema da localização de agregadores na *Smart Grid* é um problema de otimização combinatória do tipo NP-completo e deriva do *Hub Location Problem* (HLP). (Karp, 1972)

A solução deste problema determina a localização ótima dos agregadores e define a que agregador é que cada *smart meter* se deve ligar, de forma a minimizar o custo total (custo de instalação de cada agregador e o custo da sua ligação aos *smart meters* e ao SCP).

Para este problema de otimização combinatória existem dois tipos de abordagem possíveis – métodos de programação matemática (que possibilitam obter soluções exatas) e abordagens meta-heurísticas. Para problemas de grandes dimensões, os métodos exatos exigem grande esforço computacional (tempo de cálculo) até chegarem à solução ótima (ou a menos de uma tolerância). As abordagens meta-heurísticas obtêm, em geral, uma solução mais rapidamente, para a qual, no entanto, não é possível garantida a otimalidade.

Esta dissertação está organizada em 7 capítulos. O primeiro consiste numa introdução do trabalho. No capítulo 2 é apresentada uma visão geral das *Smart Grids* e é descrita a arquitetura da AMI. No capítulo 3 é descrito o

problema da localização de agregadores, bem como o problema do qual deriva – HLP. Este capítulo termina com uma breve contextualização do estado da arte.

O capítulo 4 é dedicado à formulação dos modelos matemáticos do problema de localização de agregadores na *Smart Grid*.

No capítulo 5 são apresentados os resultados computacionais obtidos com o *solver CPLEX* para os modelos apresentados no capítulo anterior. No capítulo 6 é apresentada uma abordagem meta-heurística e respetivos resultados para um dos modelos.

Por último, no capítulo 7 é feita uma recapitulação dos principais pontos deste estudo, fornecendo uma análise crítica e conclusiva dos resultados obtidos.

## 2. Smart Grid

Neste capítulo é apresentada uma caracterização geral das *Smart Grids*, apresentando os principais elementos que fazem parte da estrutura da AMI.

### 2.1. Conceito

A rede elétrica tradicional possui, em geral, um número reduzido de instalações de produção de energia. Esta produção é tipicamente centralizada, com centrais baseadas em combustíveis fósseis (carvão e gás natural), grandes centrais híbridas e centrais nucleares. Os sistemas de energia têm evoluído no sentido da produção descentralizada, baseada em energias renováveis – em particular, solar ou eólica. As instalações de produção, podem ser de grandes dimensões – parques eólicos, por exemplo ou de pequena capacidade dispersas por todo o território, como, por exemplo, painéis solares fotovoltaicos existentes nas residências. Assim, na rede elétrica atual, os utilizadores podem assumir dois papéis em simultâneo, consumidores e produtores. Com o crescente número de pequenos produtores, há um fluxo bidirecional de energia, podendo ser a quantidade de energia injetada na rede por estes produtores muito variável.

Esta mudança de paradigma resulta num aumento da dificuldade da gestão da rede, nomeadamente para equilibrar o consumo e a produção de energia. As intervenções para estabilizar a rede elétrica, devido a desequilíbrios entre a oferta e a procura, são cada vez mais frequentes. As maiores dificuldades associadas à gestão da rede refletem-se em custos cada vez mais avultados, resultando posteriormente em tarifas mais elevadas para os consumidores. (Matos, Gonçalves, Seca, & Mendes, 2017)

Esta mudança de realidade dá origem à necessidade de reformular a rede elétrica. A solução baseia-se na incorporação de tecnologias de informação e comunicação (TIC) e da computação, geralmente designada por *Smart Grid*. As características desta rede inteligente permitem uma gestão mais eficaz e eficiente, garantindo maior segurança e confiabilidade no sistema.

Segundo (Uluski, 2010), o conceito de *Smart Grid* está assente em 5 áreas, tal como é ilustrada na figura 1:

- *Smart Metering* – permite fazer medições avançadas de consumo energético, providencia ao consumidor informação das tarifas energéticas e permite uma gestão mais eficiente dos consumos;
- *Smart Distribution Feeders* – novos sensores que permitem o feedback acerca das condições da rede de distribuição;
- *Smart Substations* – consiste no uso de dispositivos eletrónicos inteligentes (IEDs) que permitem a monitorização e controlo dos equipamentos dentro de uma subestação;

- *Smart Transmission* - consiste no uso de *Phasor Measurement Units* (PMUs) que permite um controlo mais eficiente e preciso da rede elétrica;
- *Smart Central Generation* – consiste no uso de novas ferramentas em instalações de geração de energia, visando o aumento da eficiência e diminuição dos custos envolvidos no processo de produção.

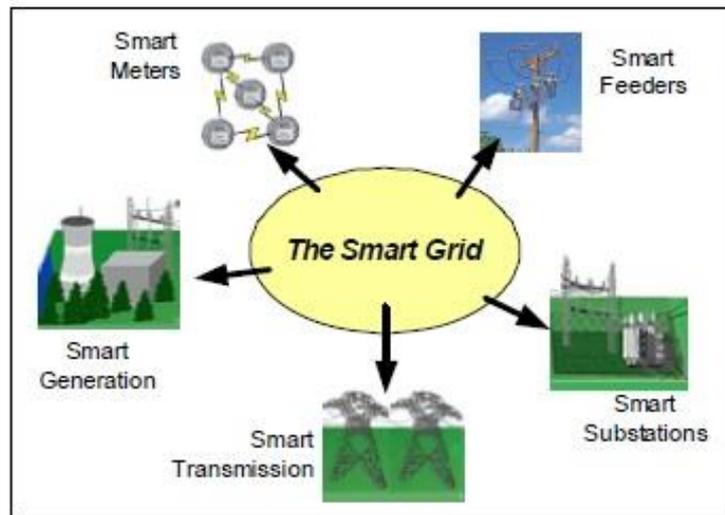


Figura 1 - Áreas da Smart Grid, extraída de (Uluski, 2010)

As vantagens, segundo (Wei, Yu-hui, & Jie-lin, 2009), da *Smart Grid* são:

- Autorrecuperação – através de toda a gama de sensores, a rede tem a capacidade de, em tempo real, antecipar, detetar e corrigir eventuais falhas. Assim, a *Smart Grid* tem a capacidade de manter a qualidade de serviço;
- Maior participação por parte dos consumidores – as medições inteligentes em tempo real permitem que os consumidores controlem os seus equipamentos, visando uma melhor gestão e, conseqüente, redução dos consumos;
- Tolerância a ataques externos – a informação que chega ao sistema de controlo acerca do estado da rede, permite em caso de alguma falha, causada por algum desastre ambiental ou ciberataque, redirecionar os fluxos por percursos alternativos;
- Compatível com uma grande variedade de fontes e fluxos energéticos – permite que os consumidores/produtores de energia, em caso de excesso de energia, possam fornecê-la à rede, para o que é necessário uma interconexão eficiente entre as várias fontes de geração. Este fator contribui para reduzir o preço da eletricidade e aumenta as escolhas do consumidor;

- Maior eficiência – a otimização na produção e distribuição de energia reduzem os custos da gestão da rede, refletindo-se nas faturas dos clientes.

## 2.2. Tecnologia de Medição

O sistema de leitura de dados foi evoluindo ao longo do tempo. O sistema de medição envolvido no primeiro planeamento da *Smart Grid* era o *Automatic Meter Reading* (AMR). Este sistema de medição veio substituir a leitura manual dos contadores, caracterizada pelo elevado grau de imprecisão e por ser dispendiosa. No entanto, este sistema não permite que o cliente tenha conhecimento dos seus consumos energéticos em tempo real.

A tecnologia *Advanced Meter Infrastructure* (AMI) consiste numa evolução do sistema AMR. Esta tecnologia tem por base a instalação de *smart meters* nas residências dos clientes. Estes leitores inteligentes permitem uma comunicação bidirecional entre o cliente e operador da rede de distribuição, bem como, que o cliente ligue e desligue equipamentos de forma remota. A medição em tempo real fornece ao cliente informação dos seus consumos e, desta forma, permite que seja feita uma gestão dos consumos muito mais eficiente, com a consequente redução dos custos. Os sistemas AMI também podem ser utilizados para verificar falhas e restauração do serviço, bem como interrogar e controlar equipamentos de automação de distribuição (Electric Light & Power, 2008).

A figura 2 ilustra a interligação existente entre o *smart meter* e os vários setores de uma residência para que seja possível a medição dos consumos.



Figura 2 - Esquema Ilustrativo de smart metering numa residência, extraída de (Santos, 2013)

Na AMI a comunicação é dividida em três áreas: *Home Area Network (HAN)*, *Neighbour Area Network (NAN)* e *Wide Area Network (WAN)*. Na HAN é estabelecida a comunicação entre os *smart meters* e os equipamentos existentes numa residência, ou seja, a informação dos consumos de cada equipamento é passada para o *smart meter*. A NAN estabelece a ligação entre a HAN e a WAN, controlando a distribuição de energia pelos clientes de acordo com as necessidades de cada um. Por último, a WAN está relacionada com a interconexão entre os consumidores locais e a rede de distribuição, cobrindo toda a extensão desde o sistema central até à região local da NAN (Souza, et al., 2016). Na figura 3 estão representadas as três áreas de comunicação descritas e ainda uma quarta – *Head-End System (HES)*. Esta quarta área corresponde ao SCP e, por isso, é nesta camada que são processados os dados de informação.

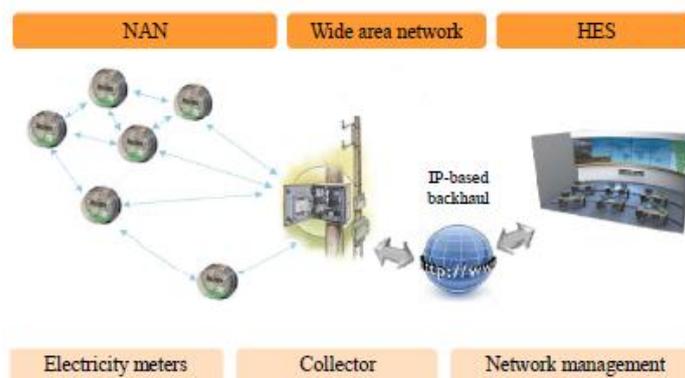


Figura 3 - Áreas de comunicação na Smart Grid, extraída de (Souza, et al., 2016)

### 2.3. Arquitetura da Smart Grid

A arquitetura da rede de comunicações associada à interligação dos *smart meters* no contexto duma infraestrutura AMI apresenta, em geral, uma topologia em árvore. Cada agregador representa um nó de uma subárvore. Nesta topologia destacam-se três entidades fundamentais, que compõem os três níveis da rede, com funções distintas – Sistema Central, agregadores e *smart meters*, tal como ilustrado na figura 4. A troca de informação destes três níveis é bidirecional. Por um lado, as medições dos fatores de qualidade e consumo que são feitas pelos *smart meters* têm de ser transmitidas aos sistemas centrais, para dar informação do estado em que se encontra cada cliente, e, por outro lado, as informações de cobrança, análise e solução de problemas terão de ser transmitidas em sentido oposto.

O sistema central consiste num centro de processamento. É neste local que é interpretada toda a informação que provêm dos clientes e dos sensores distribuídos pela rede. Consoante este processamento de dados são tomadas medidas. Ao fim de um certo período de tempo, os dados são descartados por questões legais e para evitar sobrecarga de informação. (Guo, Liang, & Guo, 2016)

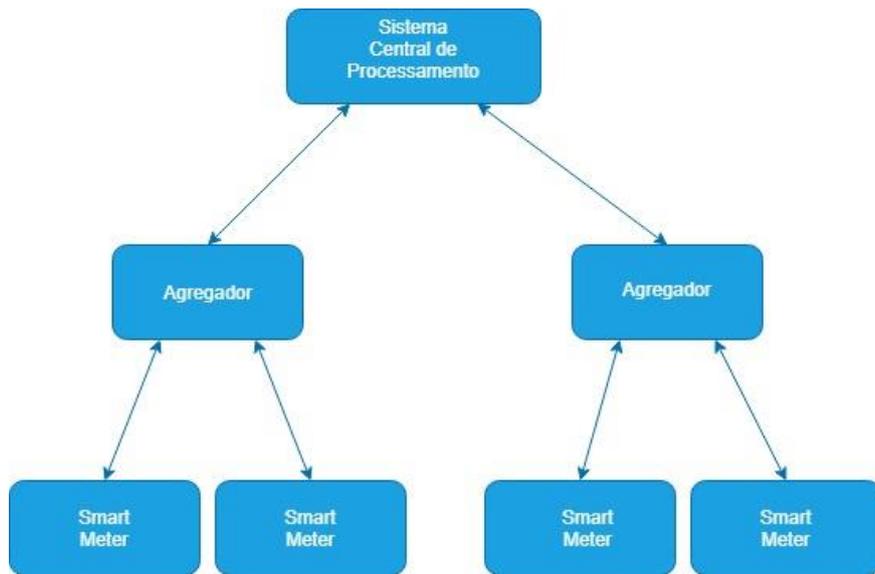


Figura 4 - Arquitetura das comunicações AMI na Smart Grid. Imagem adaptada de (Guo, Liang, & Guo, 2016)

O agregador é a interface entre o sistema central e os clientes finais, servindo assim de gestor da troca de dados entre os *smart meters* e operador de rede, numa certa região. Os agregadores devem ter capacidade de estabelecerem comunicação, apesar da variedade tecnológica existente entre os servidores e os medidores, tal como ilustrado na figura 5. Por um lado, os medidores são configurados com a NAN, apresentando uma largura de banda limitada e baixo consumo de energia; por outro lado, os servidores atuam na camada WAN, onde a largura de banda e a velocidade de transmissão de dados são maiores. Os agregadores devem ter interfaces flexíveis para lidarem com esta vasta gama protocolar.

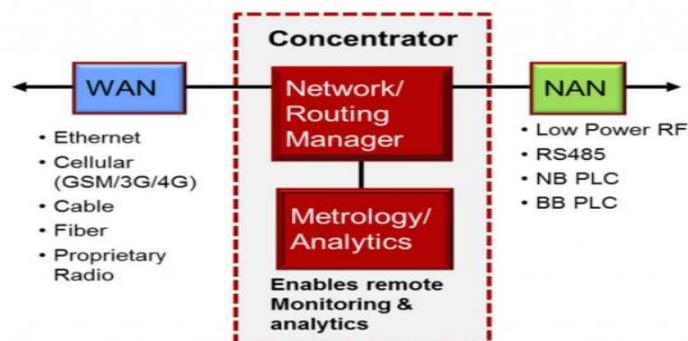


Figura 5 - conexão da WAN com a NAN, feita por agregador. Imagem extraída de (Hao, 2014)

### 3. Problema de Localização

Neste capítulo pretende-se fazer um enquadramento do problema que é alvo de estudo neste trabalho. Para este efeito, começa-se por fazer uma descrição dos tipos de problemas de localização existentes (*Hub Location Problems*). De seguida, analisam-se as características do problema de localização de agregadores na *Smart Grid*. É depois feita uma breve descrição dos métodos de resolução de problemas de otimização. Este capítulo termina com uma descrição de alguns estudos sobre os problemas de localização.

#### 3.1 *Hub Location Problems* (HLB)

Nas redes *hub-and-spoke* (HS) o tráfego, que é originado em diversos pontos distribuído por toda a região de análise, flui através de diversos caminhos (*spokes*) e concentra-se num conjunto menor de pontos (*hubs* ou concentradores). O *Hub Location Problem* (HLP) é um problema de otimização combinatoria que resulta do projeto de uma rede HS.

O HLP pertence à classe de problemas NP-Completo, pelo que não é possível obter soluções ótimas exatas em tempo útil para problemas de dimensão elevada. A sua complexidade reside na inter-relação entre dois níveis do processo de decisão. O primeiro nível passa por selecionar um conjunto de nós, ou de pontos no espaço, para localizar os concentradores, enquanto o segundo nível consiste em definir a configuração da rede, ou seja, selecionar as ligações entre os pontos geradores de tráfego e os concentradores.

O concentrador, é um equipamento que permite realizar a conexão de pontos geradores de tráfego de uma rede e possibilitar a transmissão de informações entre eles.

Existem diversos tipos de problemas de localização de concentradores. Cada tipo de problemas é definido por um conjunto de características da rede. Neste sentido, é necessário definir algumas características que as redes podem assumir:

1. Conexão simples ou conexão múltipla;
2. Permissão, ou não, de comunicação direta entre clientes;
3. Conectividade entre concentradores (total ou parcial);
4. Problema capacitado ou não capacitado;
5. Modo de determinação do número de concentradores – exógeno ou endógeno.

Problemas de conexão simples (*single allocation*) ou conexão múltipla (*multiple allocation*) – na conexão múltipla há a possibilidade de um cliente se ligar a mais do que um concentrador, enquanto que na conexão simples cada cliente só se pode ligar a um único concentrador.

Problema capacitado (*capacitated*) ou não capacitado (*uncapacitated*) – o problema diz-se capacitado quando existem limitação do fluxo máximo suportado pelo concentrador e não capacitado no caso contrário.

Modo de determinação do número de concentradores - exógeno ou endógeno: no primeiro caso, o número de concentradores é definido pelo analista à priori, através de uma restrição na formulação do problema; no segundo caso, o número de concentradores é uma variável do problema, sendo definido pelo próprio processo de otimização.

Segundo (Campbell & O’Kelly, 2012), existem quatro tipos de HLP:

1. Problema p-Median (*p-hub Median Location Problem*) - o número de concentradores ( $p$ ) é definido à priori (exógeno). Tem como objetivo determinar os locais para a instalação de um certo número de concentradores, de tal forma que a soma dos custos de todos os trajetos pontos geradores de fluxo-concentradores seja a menor possível;
2. Problema de concentradores com custos fixos (*Hub Location Problem with Fixed Costs*) - é um problema similar ao problema p-Median, no sentido em que também tem como objetivo a localização de concentradores visando a minimização dos custos dos trajetos. No entanto, existem duas diferenças: a determinação do número de concentradores é endógena e é considerando um custo fixo na instalação de concentradores;
3. Problema p-Center (*p-Hub Center Location Problem*) - é um problema do tipo exógeno. Este problema consiste em encontrar o concentrador mais próximo que seja capaz de cobrir todas a exigências de fluxo, ou seja, pretende-se encontrar o concentrador mais próximo (minimizar o raio de convergência) para o qual seja garantida a cobertura do máximo fluxo existente na rede;
4. Problema de cobertura de concentradores (*Hub Covering Location Problem*) - neste tipo de problema os locais de procura apenas são considerados se se encontrarem a uma distância máxima específica dos clientes que seja capaz de cobrir a procura. Este tipo de problema divide-se em dois grupos:
  - garantir a cobertura para o máximo fluxo, minimizando, ao mesmo tempo, os custos relativos à instalação de concentradores que são necessários (tipo 1);
  - através de um número estabelecido à priori de concentradores, garantir a máxima cobertura (tipo 2);

### 3.2 Problema da Localização de Agregadores na *Smart Grid*

Uma vez que a *Smart Grid* é uma rede *hub-and-spoke*, do seu projeto resulta um problema de localização, problema da Localização de Agregadores. Este problema é uma especificação do HLP, em que os pontos de tráfego e os concentradores são os *smart meters* e os agregadores, respetivamente.

A resolução deste problema consiste em definir os nós em que vão ser instalados agregadores, de entre os locais potenciais, e, ao mesmo tempo, definir quais as ligações *smart meter*-agregador, isto é, a que agregador é que cada *smart meter* se liga.

Tal como será apresentado na secção 3.4, o problema da localização de agregadores na *Smart Grid* é capacitado, dado que é pouco realista considerar uma rede cujos agregadores tenham capacidade ilimitada para se ligar aos *smart meters*. Uma outra característica deste problema é a conexão simples entre *smart meters* e agregadores, porque se trata de um problema cujo objetivo é minimizar os custos na implementação da rede. No caso de se considerar conexão múltipla, iria existir uma multiplicação dos custos de transferência de informação em virtude da multiplicação do número de ligações, algo que não é desejável, a não ser em contextos em que a resiliência seja muito importante.

### 3.3 Métodos de Resolução:

As técnicas para a obtenção de soluções de problemas de otimização combinatória, como é o caso do problema de localização de agregadores na *Smart Grid*, podem ser genericamente divididas em dois tipos:

- Abordagens Exatas de Programação Matemática – que garantem a obtenção da solução ótima, satisfazendo todas as restrições do modelo matemático. Estes métodos exigem um grande esforço computacional (– tempo de execução), sendo apenas viáveis para problemas até certa dimensão, apesar de estar disponíveis *solvers* cada vez mais poderosos;
- Abordagens Heurísticas – são procedimentos que abordam os problemas de otimização sem ter, em geral, garantia teórica de que a solução ótima é obtida e mesmo, nalguns casos, que a solução obtida seja próxima da solução ótima. Este tipo de abordagem garante por via empírica que é atingida uma “boa solução”, comparativamente à vasta maioria das alternativas disponíveis (Gaspar-Cunha, Antunes, & Takahashi, 2012).

Dentro das abordagens heurísticas têm ganho particular relevância as meta-heurísticas. Estas são métodos que resolvem problemas de otimização através de mecanismos adaptativos de alto nível que guiam heurísticas de baixo nível adaptadas às características do problema. Podem ser baseadas na pesquisa de soluções em regiões com maior potencial na vizinhança da solução atual ou baseadas em populações de soluções que evoluem ao longo das iterações, equilibrando mecanismos de diversificação e de intensificação da pesquisa de modo a escapar de ótimos locais. Estes métodos atingem, em geral, soluções de muito boa qualidade para problemas de grandes dimensões com um esforço computacional moderado. São exemplos de meta-heurísticas:

- Tabu Search (TS) – a procura de novas soluções é efetuada na vizinhança da solução atual. Este método usa esquemas de memória de curto prazo (lista tabu para não repetir movimentações recentes) e de longo prazo tentando evitar a possibilidade de ficar preso num ótimo local;
- Simulated Annealing (SA) – são pesquisadas soluções vizinhas da solução inicial; em geral, se a solução vizinha é melhor do que a atual, toma o lugar desta, mas mesmo não o sendo pode tomar o seu lugar de acordo com uma dada probabilidade de aceitação da solução competidora na vizinhança da solução atual;
- Algoritmo Genético (AG) – são métodos estocásticos de pesquisa baseados na Teoria da Evolução Natural das Espécies, em que uma população de soluções evolui através de operadores de seleção, cruzamento e mutação;

Em (Gaspar-Cunha, Antunes, & Takahashi, 2012) são descritas e exemplificadas algumas das meta-heurísticas mais utilizadas.

### 3.4 Alguns Estudos Sobre o Problema de Localização

Esta secção está dividida em duas partes. Na primeira parte é feita uma caracterização de HLPs que foram alvo de estudo por diversos autores. Na segunda parte são citados alguns estudos sobre o problema de localização de agregadores na *Smart Grids* e dos métodos utilizados para a sua resolução.

#### 3.4.1 Estudos sobre HLPs

Em (Karimi & Bashiri, 2011) são analisados dois problemas, ambos do tipo 4 (conforme a classificação na secção 3.1). A única diferença existente entre os dois problemas que são alvo de estudo é o tipo de ligação, sendo no primeiro problema, considerada a ligação simples e no segundo a ligação múltipla. Os problemas são endógenos e não capacitados. São impostas limitações de distância, impedindo que existam ligações cuja distância exceda um valor pré-definido.

Em (Shetty, Sharathy, & Sen, 1992) o alvo de estudo é um problema do tipo 1. O problema é capacitado, ou seja, são tidas em conta questões relacionadas com a limitação de capacidade dos concentradores, de conexão múltipla e exógeno.

Em (Nassi & Lopes, 2010) são analisadas as várias combinações de características de problemas do tipo 2, ou seja, problemas de conexão simples não capacitado, conexão simples capacitado, conexão múltipla não capacitado e de conexão múltipla capacitado.

Em (Almeida, Senne, & Yanasse, 2012), o problema em causa é do tipo 1, tendo como características ser não capacitado e de conexão múltipla.

### 3.4.2 Estudos sobre o problema de localização de agregadores na *Smart Grid*

Em (Souza, et al., 2016) o problema analisado é semelhante a um problema do tipo 2, ou seja, o problema é capacitado e de conexão simples. É feita uma abordagem exata através de um modelo de programação linear binária. É implementada a meta-heurística *k-means* e são comparados os resultados das duas abordagens.

Em (Guo, Liang, & Guo, 2016) o problema é semelhante a um problema do tipo 4, capacitado e de conexão simples. A tecnologia utilizada para a comunicação é PLC. A meta-heurística utilizada é um algoritmo genético.

Em (Tavasoli, Yaghmaee, & Mohajerzadeh, 2016) existem duas opções para definir a localização de agregadores – AN (*Available Nodes*) e PN (*Potential Nodes*). Nos AN já existe uma infraestrutura instalada anteriormente, contrariamente ao que acontece com os PN. Neste trabalho foram combinadas as tecnologias de transmissão – WIMAX e fibra ótica, podendo cada cliente ser conectado ao concentrador através de uma destas duas tecnologias. Esta decisão é tomada com base nos custos de comunicação e de instalação. Para resolver este problema foi utilizada a abordagem *K-means clustering*.

Em (Aalamifar, Shirazi, Noori, & Lampe, 2014) o problema é semelhante a um problema do tipo 4, capacitado e de conexão simples. A tecnologia utilizada é sem fios. A abordagem implementada é *K-means clustering*.

Em (Huang & Wang, 2015) o problema é semelhante a um problema do tipo 4, capacitado e de conexão simples. A meta-heurística utilizada foi um algoritmo genético.

## 4. Modelos:

Com base na análise acima descrita sobre alguns estudos realizados para resolver o Problema da Localização de Agregadores nas *Smart Grids*, a primeira fase do trabalho consistiu em rescrever de forma coerente. Neste capítulo são apresentados vários modelos com o objetivo de cobrir uma gama considerável de cenários realistas.

### Índices, conjuntos e parâmetros

### Definição

$a$	Número de <i>Available Nodes</i> (AN), locais onde podem ser instalados agregadores, nos quais existem infraestruturas da rede elétrica anterior que podem ser reaproveitadas;
$p$	Número de <i>Potential Nodes</i> (PN), locais onde podem ser instalados agregadores, mas nos quais ainda não existe qualquer tipo de infraestruturas;
$n$	Número de locais nos quais pode ser instalado um concentrador, sendo $n = a + p$ ;
$A$	Conjunto de todos os AN, sendo $A = \{1, 2, \dots, a\}$ ;
$P$	Conjunto de todos os PN, sendo $P = \{1, 2, \dots, p\}$ ;
$M$	Conjunto de todos os <i>Smart Meters</i> , sendo $M = \{1, 2, \dots, m\}$
$N$	Conjunto de todos os locais onde podem ser instalados agregadores, sendo $N = \{1, 2, \dots, n\}$ , $N = A \cup P$ e $A \cap P = \emptyset$ ;
$e$	Número máximo de agregadores a instalar;
$c_i$	Custo fixo associado à instalação e utilização do agregador $i$ ;
$c_i^{AN}$	Custo de instalação do agregador $i$ num AN;
$c_i^{PN}$	Custo de instalação do agregador $i$ num PN;
$d_{ij}$	Distância entre o <i>smart meter</i> $j$ e o concentrador $i$ ;
$d_{max}^{SF}$	Alcance máximo da transmissão sem fios no caminho entre <i>smart meters</i> e agregadores;
$d_{max}^{FO}$	Alcance máximo da transmissão feita por fibra ótica no caminho entre <i>smart meters</i> e agregadores;
$dc_i$	Distância entre o agregador $i$ e o sistema central;
$dc_{max}^{SF}$	Alcance máximo da transmissão sem fios no caminho entre agregadores e o sistema central;

$dc_{max}^{FO}$	Alcance máximo da transmissão feita por fibra ótica no caminho entre agregadores e o sistema central;
$f_j$	Fluxo de dados gerado pelo <i>smart meter j</i> ;
$t_{ij}$	Custo da transferência de dados do <i>smart meter j</i> para o agregador <i>i</i> ;
$t_{ij}^{SM\_A\_FO}$	Custo da transferência de dados do <i>smart meter j</i> para o agregador <i>i</i> , utilizando fibra ótica;
$t_{ij}^{SM\_A\_SF}$	Custo da transferência de dados do <i>smart meter j</i> para o agregador <i>i</i> , utilizando WIMAX;
$t_{ij}^{A\_SC\_SF}$	Custo da transferência de dados do <i>agregador i</i> para o Sistema Central, utilizando WIMAX;
$t_{ij}^{A\_SC\_FO}$	Custo da transferência de dados do <i>agregador i</i> para o Sistema Central, utilizando fibra ótica;

#### Variáveis de Decisão:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{se o agregador } i \text{ for instalado;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$x_i^{SF} = \begin{cases} 1, & \text{se o agregador } i \text{ for instalado e ligado ao Sistema Central através de WIMAX;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$x_i^{FO} = \begin{cases} 1, & \text{se o agregador } i \text{ for instalado e ligado ao Sistema Central através de fibra ótica;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$x_i^{PLC} = \begin{cases} 1, & \text{se o agregador } i \text{ for instalado e ligado ao Sistema Central através de PLC;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o smart meter } j \text{ é atribuído ao agregador } i; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$y_{ij}^{FO} = \begin{cases} 1, & \text{se o smart meter } j \text{ se ligar ao agregador } i \text{ através de fibra ótica;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$y_{ij}^{SF} = \begin{cases} 1, & \text{se o smart meter } j \text{ se ligar ao agregador } i \text{ através de WIMAX;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$y_{ij}^{PLC} = \begin{cases} 1, & \text{se o smart meter } j \text{ se ligar ao agregador } i \text{ através de PLC;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Em todos os cenários, definiu-se que só é possível ocorrer um único salto no percurso percorrido pela informação entre o emissor e o recetor, contrariamente ao que acontece em ligações *mesh*, nas quais podem ocorrer múltiplos saltos entre *smart meters* até que a informação chegue ao agregador.

Nos primeiros modelos que foram construídos neste capítulo, não foram tidas em conta quaisquer considerações relativas à tecnologia utilizada para assegurar a transferência de informação entre *smart meters* e agregadores e entre agregadores e o sistema central.

Estes modelos foram construídos de modo a serem o mais realistas possível, para o problema capacitado e de ligação simples.

Os modelos, são apresentados por ordem crescente de complexidade, traduzindo-se num aumento progressivo do número de restrições.

### Modelo A:

Função objetivo:

$$z = \min \sum_{i=1}^n x_i c_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_{ij} t_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n y_{ij} = 1, \quad \forall j \in M \quad (2)$$

$$x_i \geq y_{ij}, \forall i \in N, \quad \forall j \in M \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^m f_j y_{ij} \leq x_i b_i, \quad \forall i \in N \quad (4)$$

$$x_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in N \quad (5)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, \forall j \in M \quad (6)$$

A função objetivo pretende a minimização dos custos referentes à transferência de dados entre os *smart meters* e os concentradores e os custos associados à instalação e utilização dos concentradores.

As restrições modelam as seguintes condições que uma solução deve respeitar:

(2) garante que este modelo é de conexão simples, impedindo que um *smart meter* seja ligado a mais do que um concentrador;

(3) trata-se de uma restrição de coerência interna, visto que só no caso de um concentrador ser instalado é que poderá ser ligado *smart meters*;

(4) garante que a soma de todos os fluxos de dados gerados pelos *smart meters* que estão ligados a um concentrador não excede a capacidade deste;

(5) e (6) indicam que as variáveis de decisão são binárias.

Este modelo serve, frequentemente, de base para outros modelos, nos quais são introduzidas restrições adicionais para que seja possível resolver problemas mais específicos, tal como acontece neste estudo.

Este modelo foi proposto em (Souza, et al., 2016), para o caso específico de uma rede baseada nas tecnologias *ZigBee* e GPRS.

De seguida, foi construído o modelo B que considera um número máximo de agregadores instalados. Em muitos estudos o número de agregadores instalados é resultado da implementação do modelo e não um parâmetro de entrada. No entanto, a restrição (7) deverá ser introduzida caso o projetista da rede não queira ultrapassar um determinado número de agregadores instalados como forma de reduzir o valor dos custos de instalação.

### Modelo B:

Função objetivo:

$$z = \min \sum_{i=1}^n x_i c_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_{ij} t_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$(2)-(6)$$
$$\sum_{i=1}^n x_i \leq e \quad (7)$$

No modelo C dividiu-se o número de locais com potencial para a instalação concentradores (N) em dois conjuntos – *Available Nodes (AN)* e *Potential Nodes (PN)*. Os AN são locais onde já existem infraestruturas da rede elétrica, passíveis de serem reaproveitadas para integrar a rede inteligente. Estes pontos podem ser vistos como uma via para a redução de custos de instalação de agregadores. Os PN são locais onde ainda não existe qualquer tipo de infraestruturas, mas que, devido à sua localização, representam uma aposta viável para a instalação de concentradores. Assim, é expectável que com este modelo seja possível obter um valor ótimo mais baixo do que os valores obtidos nos modelos anteriores.

A partir deste modelo, não é considerada a limitação do número de agregadores que são instalados, deixando de ser necessária a restrição (7) na implementação dos próximos modelos.

### Modelo C:

Função objetivo:

$$z = \min \sum_{i=1}^a x_i c_i^{AN} + \sum_{i=1+a}^n x_i c_i^{PN} + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n t_{ij} y_{ij} \quad (8)$$

Sujeito a:

$$(2)-(6)$$

Na componente dos custos de instalação da função objetivo (8), é tido em conta que existem os dois tipos de locais (AN e PN), com custos de instalação diferentes. Em geral a instalação de concentradores em *Available Nodes* é mais barata, visto que há aproveitamento das infraestruturas existentes.

O modelo C foi desenvolvido com base em (Tavasoli, Yaghmaee, & Mohajerzadeh, 2016). No entanto, existem algumas diferenças entre os dois, uma vez que, o modelo desenvolvido por (Tavasoli, Yaghmaee, & Mohajerzadeh, 2016) é de ligação múltipla, podendo um *smart meter* ligar-se a mais do que um agregador. Para além disso, esse estudo também tem como finalidade determinar qual a tecnologia utilizada em cada ligação *smart meter* – agregador, de entre a fibra ótica e uma tecnologia sem fios (*wimax*). Este aspeto híbrido ao nível da ligação também é alvo de análise mais à frente, nomeadamente no modelo G. Assim, o modelo de (Tavasoli, Yaghmaee, & Mohajerzadeh, 2016) é dividido em dois (modelo C e G) para que seja possível a análise separada da influência de cada consideração – existência de locais AN e PN (caraterística do problema analisada no modelo C) e determinar se a ligação *smart meter* – agregador é feita por uma tecnologia com ou sem fios (caraterística do problema analisada no modelo G).

A partir deste ponto são feitas considerações relativas ao tipo de tecnologia utilizada. Consoante a densidade de *smart meters* e a distância entre estes e os concentradores aos quais estão ligados, podem ser consideradas várias possibilidades, do ponto de vista tecnológico.

No modelo D, considera-se a utilização de fibra ótica para estabelecer a comunicação entre os *smart meters* e os agregadores. Neste sentido as restrições (2) a (6) são rescritas. Na função objetivo consideraram-se os custos da transferência de dados associados à utilização de fibra ótica. É considerada uma distância máxima entre um *smart meter* e um agregador para ter em conta perdas de informação, as quais não são permitidas. Da mesma forma, não são permitidos os casos em que a distância a que o agregador se encontra do sistema

central de uma determinada zona exceda um determinado valor. Assim, são introduzidas as limitações nos índices dos somatórios nas duas componentes da função objetivo para restringir a distância a que os agregadores se podem encontrar dos clientes e do sistema central.

**Modelo D:**

Função Objetivo:

$$z = \min \sum_{\substack{i \\ dc_i \leq dc_{max}^{FO}}}^n x_i^{FO} c_i + \sum_{j=1}^m \sum_{\substack{i=1 \\ d_{ij} \leq d_{max}^{FO}}}^n y_{ij}^{FO} t_{ij}^{SM\_A\_FO} + \sum_{\substack{i=1 \\ dc_i \leq dc_{max}^{FO}}}^n x_i^{FO} t_{ij}^{A\_SC\_FO} \quad (9)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^m y_{ij}^{FO} f_j \leq b_i, \quad \forall i \in N \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{ij}^{FO} = 1, \quad \forall j \in M \quad (11)$$

$$x_i^{FO} \geq y_{ij}^{FO}, \quad \forall i \in N, \forall j \in M \quad (12)$$

$$x_i^{FO} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N \quad (13)$$

$$y_{ij}^{FO} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, \forall j \in M \quad (14)$$

Este modelo foi baseado no estudo de (Huang & Wang, 2015).

O modelo E é semelhante ao anterior, mas utilizando PLC para estabelecer a comunicação. A função objetivo foi rescrita, para considerar que a tecnologia PLC já existe na rede elétrica tradicional, não sendo, por isso, considerados os custos de transferência de informação.

Na função objetivo (15), foram introduzidas duas limitações que restringem os casos a contabilizar, fazendo-se assim um raciocínio análogo ao exposto anteriormente para o caso da fibra ótica.

### Modelo E:

Função Objetivo:

$$z = \min \sum_{i=1}^n x_i^{PLC} c_i \quad (15)$$

$d_{ij} \leq d_{max}^{PLC}$   
 $dc_i \leq dc_{max}^{PLC}$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n y_{ij}^{PLC} = 1, \quad \forall j \in M \quad (16)$$

$$x_i^{PLC} \geq y_{ij}^{PLC}, \quad \forall i \in N, \forall j \in M \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^m y_{ij}^{PLC} f_j \leq x_i^{PLC} b_i, \quad \forall i \in N \quad (18)$$

$$x_i^{PLC} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N \quad (19)$$

$$y_{ij}^{PLC} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, \forall j \in M \quad (20)$$

Este modelo foi baseado em (Guo, Liang, & Guo, 2016). No entanto, na função objetivo são considerados os custos associados à instalação desta tecnologia e não foram tidas em conta as limitações associadas às perdas provocadas pelas distâncias entre as infraestruturas.

Considerando agora a conexão sem fios (por exemplo, WIMAX) como via de transmissão de dados para o mesmo tipo de problema considerado anteriormente, resulta o modelo F.

Mais uma vez, existem limitações relacionadas com a cobertura, introduzidas nos índices dos somatórios da função objetivo (15). Como anteriormente, não são considerados os casos em que a distância a que os *smart meters* estão de um agregador exceda um determinado valor, bem como, casos em que os agregadores estão a uma distância superior a um valor estipulado do sistema central.

O modelo F foi baseado no estudo de (Aalamifar, Shirazi, Noori, & Lampe, 2014). Existem diferenças ao nível da parametrização, nomeadamente, no cálculo dos custos de transferência. Optou-se por manter a mesma parametrização ao longo dos vários modelos para que a comparação do desempenho dos mesmos seja mais fácil.

## Modelo F:

Função Objetivo:

$$z = \min \sum_{\substack{i \\ dc_i \leq dc_{max}^{SF}}}^n x_i^{SF} c_i + \sum_{j=1}^m \sum_{\substack{i=1 \\ d_{ij} \leq d_{max}^{SF}}}^n y_{ij}^{SF} t_{ij}^{SM\_A\_SF} + \sum_{\substack{i=1 \\ dc_i \leq dc_{max}^{SF}}}^n x_i^{FO} t_{ij}^{A\_SC\_SF} \quad (21)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^m y_{ij}^{SF} f_j \leq x_i^{SF} b_i, \quad \forall i \in N \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{ij}^{SF} = 1, \quad \forall j \in M \quad (23)$$

$$x_i^{SF} \geq y_{ij}^{SF}, \quad \forall i \in N, \forall j \in M \quad (24)$$

$$x_i^{SF} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N \quad (25)$$

$$y_{ij}^{SF} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, \forall j \in M \quad (26)$$

A restrição (22) garante que os fluxos gerados por cada *smart meter* não ultrapassem a capacidade do concentrador ao qual estão ligados; A restrição (23) garante que cada *meter* só está ligado a um, e só um, agregador. Por último, a restrição (24) garante que só no caso de um concentrador ser instalado é que se poderá estabelecer ligação entre este e os *smart meters*.

Por último, considerou-se um cenário híbrido, no qual podem ser estabelecidas conexões com e sem fios entre os *smart meters* e os agregadores. Para este efeito, considerou-se a tecnologia WIMAX e fibra ótica. Assim, este modelo tem uma dupla finalidade: decidir quais os pontos onde serão instalados agregadores e qual o tipo de tecnologia utilizada para a transferência dos dados em cada ligação *smart meter* – agregador. Definiu-se ainda que a ligação entre agregadores e o sistema central é garantido por WIMAX. A consideração de um cenário híbrido foi feita por (Tavasoli, Yaghmaee, & Mohajezadeh, 2016); no entanto, nesse trabalho existem parâmetros não definidos e erros na formulação das restrições.

## Modelo G

Função Objetivo:

$$z = \min \sum_{i=1}^n x_i^{SF} c_i + \sum_{i=1}^n x_i^{FO} c_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_{ij}^{FO} t_{ij}^{SM\_A\_FO} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_{ij}^{SF} t_{ij}^{SM\_A\_SF} + \sum_{i=1}^n x_i^{SF} t_{ij}^{A\_SC\_SF} + \sum_{i=1}^n x_i^{FO} t_{ij}^{A\_SC\_FO} \quad (27)$$

Sujeito a:

$$d_{ij} y_{ij}^{FO} \leq d_{max}^{FO}, \quad \forall i \in N, \forall j \in M \quad (28)$$

$$d_{ij} y_{ij}^{SF} \leq d_{max}^{SF}, \quad \forall i \in N, \forall j \in M \quad (29)$$

$$dc_i x_i^{FO} \leq dc_{max}^{FO}, \quad \forall i \in N \quad (30)$$

$$dc_i x_i^{SF} \leq dc_{max}^{SF}, \quad \forall i \in N \quad (31)$$

$$x_i^{FO} + x_i^{SF} \leq 1, \quad \forall i \in N \quad (32)$$

$$\frac{\sum_{j=1}^m (y_{ij}^{FO} + y_{ij}^{SF})}{M} \leq x_i^{FO} + x_i^{SF}, \quad \forall i \in N \quad (33)$$

$$\sum_{j=1}^m (y_{ij}^{FO} f_j + y_{ij}^{SF} f_j) < x_i^{FO} b_i + x_i^{SF} b_i, \quad \forall i \in N \quad (34)$$

$$\sum_{i=1}^n (y_{ij}^{FO} + y_{ij}^{SF}) = 1, \quad \forall j \in M \quad (35)$$

$$x_i^{FO} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N \quad (13)$$

$$x_i^{SF} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N \quad (25)$$

$$y_{ij}^{FO} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, \forall j \in M \quad (14)$$

$$y_{ij}^{SF} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, \forall j \in M \quad (26)$$

A função objetivo considera os custos da instalação de agregadores e os custos de transferência de informação associados às duas tecnologias existentes.

A restrição (28) e (30) impedem que sejam estabelecidas ligações smart meter – agregador e agregador – SCP, respetivamente, por fibra ótica acima de uma distância máxima estabelecida;

A restrição (29) e (31) impedem que sejam estabelecidas ligações smart meter – agregador e agregador – SCP, respetivamente, através da tecnologia WIMAX acima de uma distância máxima estabelecida;

A restrição (32) garante que cada agregador que seja instalado só poderá lidar com um tipo de tecnologia de transmissão de informação;

A restrição (33) assegura que só no caso de um agregador ser instalado é que poderá estar ligado a *smart meters*, havendo concordância entre a tecnologia de transmissão associada à ligação e ao agregador;

A restrição (34) é a restrição de capacidade, que garante que a soma dos fluxos recebidos por um agregador não excede a sua capacidade;

A restrição (35) que todos os *smart meters* estão ligados a um agregador;

## 5. Resultados experimentais

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados do trabalho desenvolvido e tecer algumas conclusões que derivam da respetiva análise. Primeiramente, nas experiências 1 e 2 foi feita uma análise comparativa entre a limitação de tempo e a limitação de *gap* do *solver*. De seguida, os modelos A e G, que são, em teoria, o modelo mais simples e o modelo mais complexo, respetivamente, foram testados para 4 dimensões (*smart meter* × locais para a instalação de agregadores) diferentes (1000×100, 2000×200, 5000×400 e 10000×450). Por último, foram testados os restantes modelos para a dimensão 2000×200.

O computador utilizado para efetuar as experiências possui um processador *Intel Core i7 vPro 7th Gen*, memória de 64 GB e sistema operativo *Windows 10*.

Numa primeira fase, utilizou-se o software *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio* versão 12.8.0, para obter soluções ótimas exatas.

O *gap* é a tolerância relativa no intervalo entre a melhor solução inteira e a melhor solução inteira atingida e é calculado pela seguinte expressão:

$$gap(\%) = \frac{|Melhor Solução Inteira - Melhor Solução Inteira Atingida|}{1 \times 10^{-10} + |Melhor Solução Inteira Atingida|}$$

Por omissão, o tempo máximo limite do *solver* é  $1 \times 10^{75}$  segundos e o *gap* 0,01%. Caso não se alterem estes parâmetros, o *CPLEX* encerra a sua pesquisa assim que for atingido um destes valores.

### **Experiência 1:**

Por uma questão de limitação de tempo, aplicou-se um critério de paragem de execução. Nesta primeira experiência o critério de paragem foi 1 hora, não sendo nunca atingido o *gap* definido por omissão.

Os fluxos gerados por cada *smart meter* foram definidos a partir de uma distribuição uniforme com uma gama que varia entre 20 e 30 unidades. A capacidade de cada agregador foi definida a partir de uma distribuição uniforme com uma gama que varia entre 600 e 900 unidades.

Assumiu-se que o custo de instalação de cada concentrador é fixo, isto é, independente da capacidade. O valor estabelecido foi 9,3 unidades. O custo associado à transferência de informação é dependente da distância que a informação tem que percorrer desde o emissor até ao seu destino. A função que define o custo de transferência é dada por

$$Custo\ de\ Transferência = 0,001 \times D$$

sendo D a distância entre o emissor e o recetor.

Esta parametrização foi baseada em (Huang & Wang, 2015).

Inicialmente foram feitos testes para um número de *smart meters* e de potenciais locais de instalação de agregadores menor; posteriormente, de uma forma gradual, a cada teste, foram introduzidos mais *smart meters* e locais, como mostra a tabela 1.

As dimensões dos modelos foram sendo ajustadas de acordo com o número de locais e *smart meters* considerados.

Tabela 1 - Resultados da experiência 1 com limitação de 1 hora para o solver

Teste	NºSmart Meters	Nº de locais	Solução	Tempo de execução (h:min:s:cs)	Nº de agregadores instalados	GAP (%)
1	1 000	100	409,203	1:00:04:16	31	1.28
2	2 000	200	1 008,371	1:00:08:23	64	1.33
3	3 000	300	1 776,442	1:00:17:43	96	0.83
4	4 000	400	2 714,587	1:00:27:01	131	1.09
5	5 000	500	ERRO	ERRO	ERRO	ERRO
6	5 000	450	4 107,995	1:00:41:49	190	6.23
7	6 000	450	4 646,484	1:00:43:97	203	1.69
8	7 000	450	5 442,419	1:00:42:66	238	1.74
9	8 000	450	6 547,549	1:00:55:98	294	4.29
10	9 000	450	8 855,962	1:01:04:56	342	17.73
11	10 000	450	8 729,307	1:01:13:42	362	3.55
12	12 500	450	12 199,661	1:01:34:87	441	4.29
13	14 000	470	Sem Solução	1:00:39:54	Sem Solução	-----
14	14 000	490	19 453,103	1:02:00:74	474	100
15	14 000	500	19 730,148	1:02:16:69	474	100
16	18 000	700	Sem Solução	1:01:17:11	Sem Solução	-----
17	18 000	800	ERRO	00:41:07:11	ERRO	ERRO

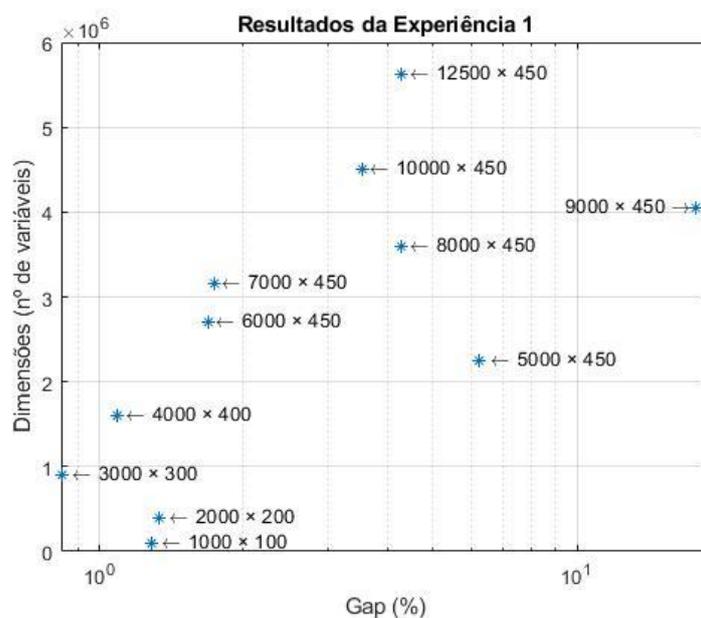


Figura 6 - Resultados da experiência 1 com limitação de 1 hora para o solver (smart meters × locais)

Verifica-se que cada agregador está ligado em média a 30 *smart meters*. Este rácio é fruto da gama definida para os fluxos dos *smart meters* e a capacidade de agregadores.

Nos testes 5 e 17 ocorreu um erro durante a execução, sinal de que não foi possível encontrar uma solução exata devido a um problema de limitação de memória RAM do computador.

No teste 13, devido às dimensões do problema, o *CPLEX* termina ao fim de uma hora sem conseguir encontrar uma solução ótima. Ainda assim, do teste 14 ao 17, aumentaram-se as dimensões do problema para descortinar se a inexistência de solução no teste 13 representava o limite da abordagem exata em termos da dimensão do modelo a otimizar. Nos testes 14 e 15 foi possível encontrar uma solução, no entanto, o *gap* é 100%, o que quer dizer que o *CPLEX* não consegue encontrar soluções com qualidade e precisão. Para o teste 16 também não foi possível encontrar uma solução ótima. No teste 17 ocorreu um erro, tal como já foi referido anteriormente. Com estes quatro testes subsequentes ao teste 13, verifica-se que existe um padrão de imprecisão na determinação da solução ótima, concluindo-se que o limite do método exato foi atingido. Assim, com o limite de tempo de execução estabelecido numa hora, a limitação da abordagem exata em termos da dimensão do modelo a otimizar é da ordem de 12 500 *smart meters* e 450 locais.

Na figura 6 são ilustradas as várias soluções obtidas nesta experiência, em função do *gap* e da dimensão do problema (*smart meters* × locais).

### **Experiência 2:**

Nesta segunda experiência alterou-se o critério de paragem, deixando de estar associado ao tempo de computação e passando a ser definido pelo *gap* existente entre o melhor nó da pesquisa e a melhor solução inteira alcançada. Inicialmente, definiu-se um *gap* de 1%; no entanto, para o problema com 1000 *smart meters* e 100 locais, decorridas praticamente 17 horas e meia de execução ainda não tinha sido encontrada uma solução. Assim, optou-se por relaxar o *gap*, passando a 1,5%. Os tempos de execução são bastante díspares, uma vez que a dificuldade de atingir um *gap* de 1,5% varia com os diferentes parâmetros de entrada.

Os parâmetros de entrada são iguais aos que foram definidos na experiência anterior.

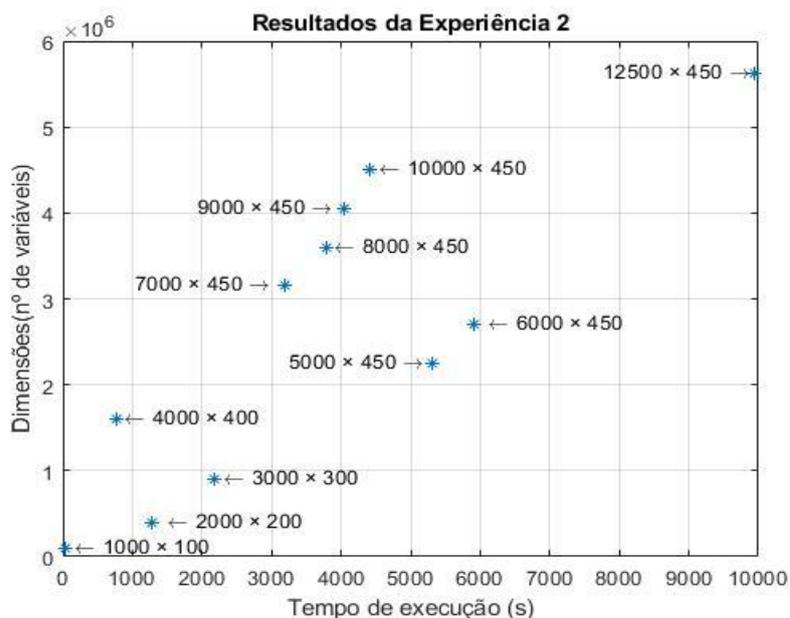


Figura 7 - Resultados da experiência 2 com limitação de 1,5% de gap para o solver (smart meters × locais)

Tabela 2 - Resultados da experiência 2 com limitação de 1,5% de gap para o solver

Teste	Nº Smart Meters	Nº de locais	Solução	Tempo de execução (h:min:s:cs)	Nº de agregadores instalados
1	1 000	100	409,609	00:00:33:68	31
2	2 000	200	1 009,332	00:21:14:46	64
3	3 000	300	1 782,672	00:36:14:33	96
4	4 000	400	2 719,254	00:12:43:69	131
5	5 000	500	ERRO	ERRO	ERRO
6	5 000	450	3 893,27	1:28:21:86	163
7	6 000	450	4 621,98	1:38:20:71	197
8	7 000	450	5 525,919	00:53:20:36	235
9	8 000	450	6 471,725	01:03:04:87	269
10	9 000	450	7 490,154	01:07:17:47	299
11	10 000	450	8 620,694	1:13:35:84	332
12	12 500	450	11 849,084	02:45:46:30	423
13	14 000	490	ERRO	1:58:37:78	ERRO
14	18 000	500	ERRO	00:29:55:62	ERRO
15	17 000	800	ERRO	24:40:00:00	ERRO

Ao comparar os testes feitos nesta experiência com os testes efetuados na experiência anterior, com iguais parâmetros de entrada, obtêm-se soluções diferentes. Este facto explica-se pelas experiências terem diferentes critérios de paragem. Por exemplo, ao comparar o teste 10 da experiência 1 com o teste 10 da experiência 2, ambos com 9 000 *meters* e 450 locais, obtiveram-se as soluções 8 855,962 e 7 490,154, respetivamente. A diferença é de 1 365,808 unidades, um valor significativo. Ao comparar os *gaps* das duas

experiências, tem-se 4.29% na primeira e 1,5% na segunda. Na segunda experiência, com pouco mais de 6 minutos de execução, para lá do tempo de execução do teste 10 da experiência 1, é possível baixar 1 365 unidades nos custos, isto é, 15% de redução relativamente ao valor da primeira experiência.

Também é possível concluir que a limitação da abordagem exata é alcançada mais rapidamente, isto é, para modelos com dimensões mais pequenas. Tal pode ser explicado pelo grau de exatidão da solução na experiência 2 ser maior, devido ao gap imposto.

Na figura 7 são ilustradas as várias soluções obtidas nesta experiência, em função do tempo de execução e da dimensão do problema (*smart meters* × locais).

Nas experiências seguintes, pretende-se avaliar a influência que a natureza pseudoaleatória da geração de dados tem nos resultados. Assim, fizeram-se vários testes com o mesmo número de *smart meters* e de locais para todos os modelos e fez-se uma análise estatística dos resultados obtidos.

Para facilitar a leitura da análise que vai ser feita, definiu-se um código para identificação das experiências, sendo o código composto por uma letra, que corresponde ao modelo utilizado, seguida das dimensões do problema (*smart meters*-locais). Por exemplo, o código A/1000-100 corresponde a uma experiência em que foi utilizado o modelo A e as dimensões do problema são 1000 *smart meters* e 100 locais potenciais para a instalação de agregadores.

#### **A/1000-100:**

O modelo utilizado para esta experiência é o A e os parâmetros de entrada são: 1000 *smart meters* e 100 locais possíveis para a instalação de agregadores. A localização dos *smart meters* é definida a partir de uma distribuição uniforme com uma gama que varia entre os 0 e as 885 unidades, nas duas direções (vertical e horizontal), isto é, os *smart meters* estão distribuídos por uma área de 885×885 metros (Aalamifar, Shirazi, Noori, & Lampe, 2014). Definiu-se que os locais para a instalação de agregadores não podem ser em zonas fronteiriças para garantir que os agregadores possam ter toda a região à sua volta disponível para se ligarem a *smart meters*. Para isso, só existem locais possíveis a 50 metros dos limites da área definida para os *smart meters*. Para esta experiência, a localização dos locais potenciais para a instalação de agregadores é definida por uma distribuição uniforme com uma gama que varia entre as 50 e as 835 unidades, nas duas direções. A figura 8, corresponde ao teste 1, e mostra uma distribuição possível dos *smart meters* e de locais para a instalação de agregadores.

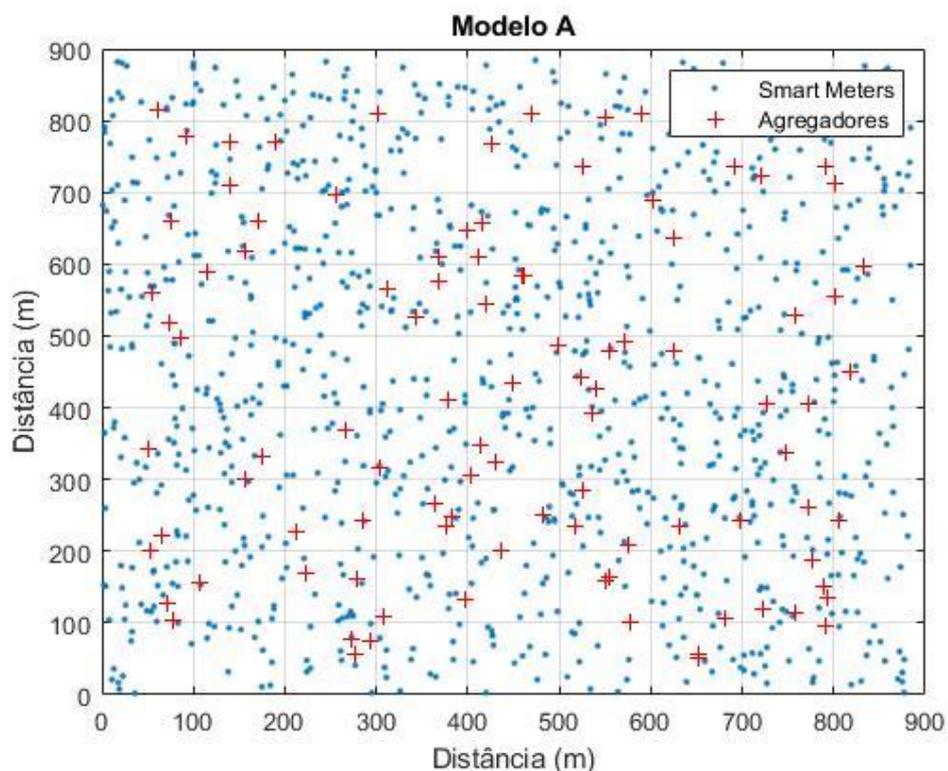


Figura 8 - Distribuição dos smart meters e dos locais potenciais para a instalação de agregadores, correspondente ao teste 1 de A/1000-100.

As dimensões desta experiência são pequenas, pelo que é expetável que os gaps de cada teste sejam baixos e não exista grande variação entre os vários testes.

Na tabela 3 encontram-se os resultados obtidos na experiência 3, bem como a média de cada uma das grandezas que estão tabeladas.

Tabela 3 - Resultados de A/1000-100 com limitação de 1 hora para o solver

Teste	Tempo de Execução (h:min:s:cs)	Nº de agregadores instalados	Solução ótima	Gap (%)	Total de Capacidade	Total de Fluxo
1	01:00:08:64	31	358,961	1,30	73 354	24 983
2	01:00:09:86	31	360,431	1,24	74 781	24 873
3	01:00:12:83	31	361,900	1,93	75 231	24 872
4	01:00:08:55	31	367,288	1,59	75 301	25 006
5	01:00:03:43	30	356,040	0,62	74 913	24 976
6	01:00:10:77	30	353,324	1,10	74 780	24 963
7	01:00:07:27	30	349,934	1,12	76 794	25 043
8	01:00:10:99	31	360,011	0,73	73 859	24 998
9	01:00:09:21	30	358,239	0,53	74 876	24 897
10	01:00:11:52	31	358,033	1,83	75 035	25 070
<b>Média</b>	01:00:09:54	30,6	358,6	1,18	74 895	24 980
<b>Desvio Padrão</b>	00:00:02:63	0,52	4,73	0,485	905,44	68,29

Os tempos de execução dos testes são próximos uns dos outros, dado que o critério de paragem foi estabelecido em uma hora. Onde se verifica a maior variação é nos totais de capacidade e nos totais de fluxo, o que se deve às gamas das distribuições uniformes das duas grandezas.

A variação das soluções ótimas é pouco significativa, pouco mais de 4 unidades, pelo que se considera que a natureza pseudoaleatória dos dados de entrada, para esta experiência, não tem grande influência nos resultados obtidos.

Na figura 9 são ilustradas as ligações que são estabelecidas entre *smart meters* e agregadores de uma região selecionada, de forma arbitrária, a partir da figura 8, bem como os locais potenciais da região em que não foram instalados agregadores.

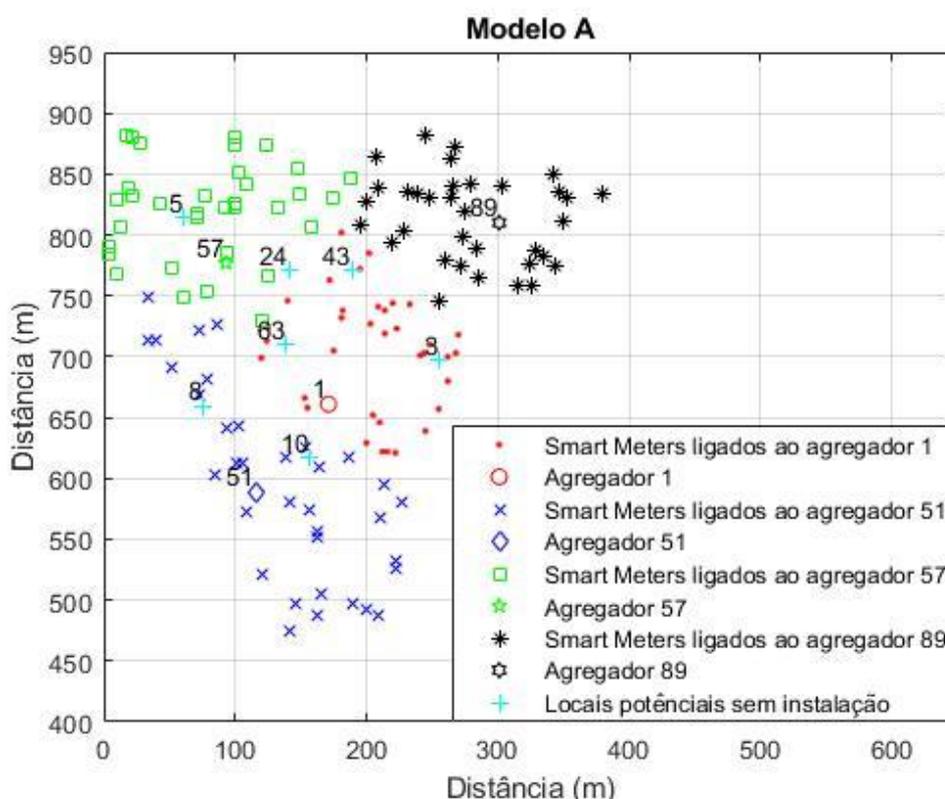


Figura 9 - Ligações estabelecidas entre smart meters e agregadores numa região selecionada da figura 3

A solução ilustrada na figura 9 é a solução ótima para um tempo de execução de uma hora. Para avaliar a exatidão da solução da região selecionada, constituiu-se um subproblema, contendo apenas os elementos que estão representados na figura 9, à exceção dos locais onde não houve instalação de agregadores (3, 5, 8, 10,

24, 43 e 63). O subproblema foi resolvido pelo *CPLEX*, não sendo definido nenhum critério de paragem de execução. O resultado do subproblema está representado na figura 10. Tal como se pode observar, as ligações estabelecidas são exatamente as mesmas. A igualdade dos resultados registada para os dois problemas pode ser explicada pelo *gap* muito baixo do problema inicial, sendo indicativo de uma solução com um grau de exatidão elevado.

Observando a figura 10, constata-se que o *smart meter* A está mais perto do agregador 57 do que o *smart meter* B. Em contrapartida, o *smart meters* B está mais perto do agregador 51 do que o *smart meter* A. No entanto, as ligações estabelecidas são: *smart meter* A – agregador 51 e *smart meter* B – agregador 57. O *smart meter* B gera um fluxo maior do que o A, fluxo esse que não pode ser transferido para o agregador 51 por limitação de capacidade, o que justifica as ligações estabelecidas.

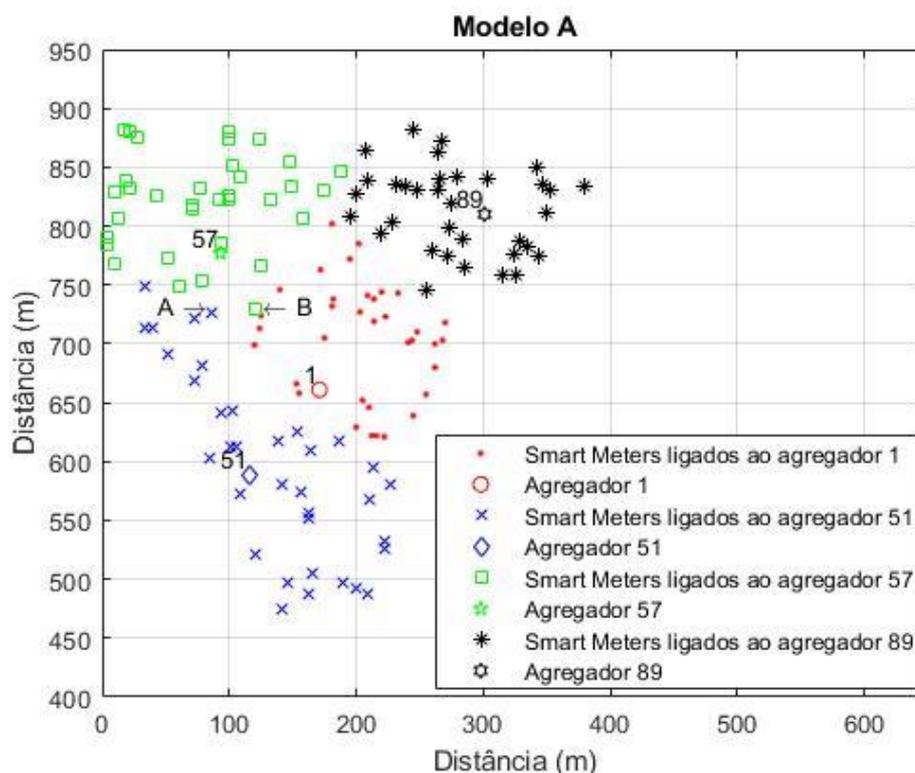


Figura 10 - Ligações estabelecidas entre smart meters e agregadores no subproblema

### **A/2000-200:**

Para esta experiência, é utilizado o modelo A e foram redefinidos os números de *smart meters* e de locais, passando a ser 2000 e 200, respetivamente. A localização dos *smart meters* é definida por uma distribuição uniforme com uma gama que varia entre 0 e 1770 metros. A distribuição dos locais potenciais é uniforme e tem uma gama que varia entre 50 e 1720 metros, pelas razões explicadas na apresentação do caso A/1000-100.

Mais uma vez, o critério de paragem do *solver* é de 1 hora de execução. Os resultados desta experiência encontram-se registados na tabela 4.

A figura A1 encontra-se em anexo e mostra a distribuição dos *smart meters* e dos locais do teste 1.

Novamente, as variações não são muito significativas; no entanto, o desvio das soluções ótimas passou, praticamente, para o dobro, o que pode ser justificado por *gaps* maiores do que os do caso A/1000-100. Os resultados de A/2000-200 encontram-se registados na tabela 4.

Tabela 4 - Resultados da A/2000-200 com limitação de 1 hora para o *solver*

Teste	Tempo de Execução (h:min:s:cs)	Nº de agregadores instalados	Solução ótima	Gap (%)	Total de Capacidade	Total de Fluxo
1	01:00:07:25	63	775,797	1,82	148 477	50 114
2	01:00:07:94	61	757,609	1,68	151 674	49 767
3	01:00:07:02	63	783,611	1,95	148 805	49 838
4	01:00:07:57	62	772,688	1,49	151 164	49 984
5	01:00:06:99	62	778,529	1,58	149 621	49 871
6	01:00:06:87	62	767,622	1,62	149 720	49 963
7	01:00:06:47	61	757,433	1,19	150 491	50 158
8	01:00:07:52	62	772,999	1,33	149 439	49 970
9	01:00:06:93	61	768,512	1,26	149 791	49 895
10	01:00:07:88	62	772,305	1,73	148 484	50 067
<b>Média</b>	01:00:07:14	62	772,500	1,60	149 670	49 967
<b>Desvio Padrão</b>	00:00:00:47	0,738	8,350	0,25	1 079,1	124,40

As variações das soluções ótimas são provocadas pelos diferentes totais de fluxos e de capacidades, mediante os quais, surgem diferentes necessidades de ligações e de instalações de agregadores, refletindo-se no valor da solução ótima.

#### **A/5000-400:**

No caso A/5000-400 é utilizado o modelo A e o número de *smart meters* é 5000 e o número de locais é 400. Para este caso, os *smart meters* foram distribuídos uniformemente entre 0 e 4425 metros. Os locais potenciais para a instalação de agregadores são distribuídos uniformemente entre 50 e 4375 metros. Como exemplo destas distribuições tem-se a figura A2, em anexo, que corresponde ao teste 1 da A/5000-400. Os resultados de A/5000-400 estão na tabela 5.

Tabela 5 - Resultados da A/5000-400 com limitação de 1 hora para o solver

Teste	Tempo de Execução (h:min:s:cs)	Nº de agregadores instalados	Solução ótima	Gap (%)	Total de Capacidade	Total de Fluxo
1	01:00:31:94	166	2 282,009	3,47	299 885	125 154
2	01:00:33:02	174	2 336,008	6,55	302 229	124 848
3	01:00:32:34	175	2 334,490	5,48	298 761	124 703
4	01:00:32:88	174	2 337,066	5,85	301 065	125 255
5	01:00:31:07	173	2 350,759	5,46	298 733	124 886
6	01:00:31:48	176	2 346,659	6,69	301 727	124 864
7	01:00:35:69	166	2 270,804	3,66	301 399	125 162
8	01:00:32:61	171	2 318,821	4,97	299 857	124 806
9	01:00:31:16	167	2 294,327	3,60	298 563	124 930
10	01:00:30:67	167	2 297,540	3,72	298 128	125 150
<b>Média</b>	01:00:32:14	172	2 326,7	5,22	299 871	124 908
<b>Desvio Padrão</b>	00:00:01:44	4,013	28,565	1,25	1 482,3	187,67

Os *gaps* dos testes desta experiência são, em média, de 5,22%, sendo considerado este um valor elevado. O desvio das soluções ótimas quase triplicou. Nesta experiência, considera-se que a aleatoriedade associada à geração de dados influencia significativamente os resultados.

#### A/10000-450:

Para esta experiência existem 10 000 *smart meters* e 450 locais. Os *smart meters* estão distribuídos uniformemente por uma área quadrada que varia entre 0 e 7000 metros. Os locais potenciais estão distribuídos uniformemente por uma área quadrada que varia entre 50 e 6950 metros. A figura A3, em anexo, ilustra a distribuição dos agregadores e dos *smart meters* no espaço. Os resultados de A/10000-450 estão na tabela 6.

Tabela 6 - Resultados da A/10000-450 com limitação de 1 hora para o solver

Teste	Tempo de Execução (h:min:s:cs)	Nº de agregadores instalados	Solução ótima	Gap (%)	Total de Capacidade	Total de Fluxo
1	01:01:11:42	348	5 167,239	3,16	336 225	250 317
2	01:01:11:66	341	5 082,273	2,18	339 255	249 670
3	01:01:09:77	350	5 187,825	4,12	336 171	249 567
4	01:01:06:08	330	5 160,247	2,44	338 231	250 682
5	01:01:14:01	347	5 180,147	2,97	335 898	249 439
6	01:01:08:76	330	5 050,525	2,74	339 412	249 954
7	01:01:24:82	342	5 045,396	2,93	339 655	249 937
8	01:01:09:20	390	5 460,724	9,50	337 448	249 226
9	01:01:12:40	358	5 316,233	5,13	335 619	249 751
10	01:01:13:28	352	5 200,466	3,58	334 752	249 990
<b>Média</b>	01:01:11:54	347,5	5 173,700	3,07	336 840	249 844
<b>Desvio Padrão</b>	00:00:05:04	17,04	125,862	2,16	1 777	425,41

O desvio entre as soluções ótimas quadruplicou, relativamente ao desvio do caso A/5000-400. Tal como seria de esperar, o crescimento progressivo das dimensões do modelo, provoca uma menor exatidão na solução ótima.

Apesar da média do gap do caso A/10000-450 não ser a mais elevada das quatro experiências, possui o desvio padrão mais elevado, como se pode observar na figura 14, muito devido ao teste 8 (gap = 9,5 %).

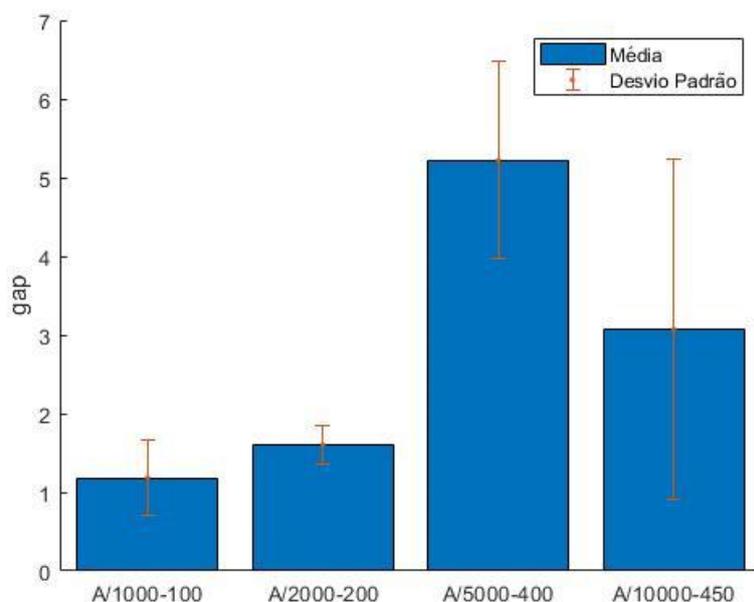


Figura 11 - Ilustração da média e desvio padrão dos gaps de A/1000-100, A/2000-200, A/5000-400 e A/10000-450

A tabela 7 contém as dimensões dos problemas dos últimos quatro casos.

Tabela 7 - Resumo das dimensões do problema de A/1000-100, A/2000-200, A/5000-400 e A/10000-450

Experiência / Dimensões do problema	A/1000-100	A/2000-200	A/5000-400	A/10000-450
Nº de smart meters	1000	2000	5000	10 000
Nº de locais	100	200	400	450

### **B/2000-200:**

No caso B/2000-200 foi testado o comportamento do modelo com 10 instâncias diferentes, sendo o número de agregadores instalados máximo fixado em 60. No entanto, nos 10 testes, em uma hora de cálculo, o *solver* não obteve nenhuma solução.

No caso A/2000-200, tal como é visível na tabela 4, em igual período, foi possível obter soluções. A diferença prende-se com o facto de o problema B ser mais complexo do que o problema A, havendo, consequentemente, uma redução da região admissível em B, sendo assim mais difícil de encontrar uma solução no mesmo período de tempo. Mesmo que seja encontrada uma solução, ela nunca poderá ser melhor do que a obtida no modelo A (para iguais parâmetros de entrada), uma vez que, com a redução da região admissível são descartadas possíveis soluções.

### **C/2000-200:**

No caso C/2000-200 é utilizado o modelo C. Neste modelo os locais potenciais são divididos em dois grupos – AN e PN.

O critério de paragem é 1 hora de cálculo.

A área de análise é de  $1770 \times 1770 \text{ m}^2$ , estando os agregadores distribuídos por uma área quadrada que varia entre os 50 m e os 1720 m de lado.

Tal como nas experiências anteriores, os fluxos gerados por cada *smart meter* foram definidos a partir de uma distribuição uniforme com uma gama que varia entre 20 e 30 unidades e a capacidade de cada agregador foi definida a partir de uma distribuição uniforme com uma gama que varia entre 600 a 900 unidades.

Definiu-se que o custo de instalação de um agregador num AN foi fixado nas 9,3 unidades, enquanto que, a instalação de um agregador num PN tem um custo fixo de 8 unidades.

A função que define o custo de transferência é dada por

$$\text{Custo de Transferência} = 0,001 \times D$$

sendo D a distância entre o emissor e o recetor.

O problema alvo de análise nesta experiência possui 2000 *smart meters* e 200 locais, dos quais  $\frac{3}{4}$  são AN e  $\frac{1}{4}$  são PN.

Tabela 8 - Resultados da C/2000-200 com limitação de 1 hora para o solver

Teste	Tempo de Execução (h:min:s:cs)	Nº de agregadores instalados		Solução ótima	Gap (%)	Total de Capacidade	Total de Fluxo
		AN	PN				
1	01:00:11:71	36	27	748,003	1,27	150 903	49 962
2	01:00:07:43	38	23	641,737	1,09	150 501	50 039
3	01:00:06:91	32	31	749,529	1,53	149 604	50 099
4	01:00:08:16	31	31	745,851	1,78	149 256	49 579
5	01:00:07:18	31	33	749,436	2,23	149 242	50 116
6	01:00:07:27	34	29	741,040	1,69	151 638	50 109
7	01:00:06:53	32	30	729,012	1,41	150 478	49 760
8	01:00:07:33	31	31	738,097	1,60	150 551	50 023
9	01:00:06:78	34	30	748,583	1,99	150 417	50 179
10	01:00:06:58	35	27	736,448	1,71	151 179	50 135
<b>Média</b>	01:00:07:23	33	30	743,446	1,65	150 490	50 069
<b>Desvio Padrão</b>	00:00:01:53	2,41	2,86	32,700	0,33	796,51	189,66

Para os casos D/2000-200, E/2000-200 e F/2000-200 os parâmetros de entrada comuns às três experiências encontram-se definidos na tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros de entrada das experiências D/2000-200, E/2000-200 e F/2000-200

Parâmetros	
Dimensões da área de análise	1770 × 1770 m <sup>2</sup>
Nº de <i>smart meters</i>	2000
Nº de locais	200
Custo de instalação de agregador	9,3
IF (Intervalo de valores dos fluxos dos <i>smart meters</i> )	20 a 30
IC (Intervalo de valores das capacidades dos agregadores)	600 a 900
Critério de paragem do solver	1 hora

Os fluxos gerados pelos *smart meters* são definidos por uma distribuição uniforme com variação IF, enquanto que as capacidades dos agregadores são definidas por uma distribuição uniforme com variação IC.

Os agregadores estão distribuídos por uma área quadrada cujo lado varia entre os 50 m e os 1720. Definiu-se ainda que o sistema central (local onde é processada a informação proveniente dos agregadores) pode estar localizado numa área central que varia entre 855 m e os 915 m de lado.

### D/2000-200:

Pretende-se agora testar o modelo D, que considera a utilização de fibra ótica para estabelecer transmissão de dados entre os *smart meters* e os agregadores e entre os agregadores e o sistema central.

Definiu-se uma distância máxima de 2000 metros (10BASE-FL). As transmissões entre elementos da *Smart Grid* que envolvam distâncias maiores do que a máxima definida, não são consideradas. Visto que a área total do mapa é  $1770 \times 1770 m^2$ , não existe nenhuma transmissão cuja distância seja maior do que 2000 metros, pelo que a limitação da distância, para este caso, não tem efeito.

Os custos de transferência contabilizam os custos de transferência entre smart meters e agregadores e os custos de transferência entre agregadores e o sistema central, sendo definidos pela função:

$$\text{Custos de transferência} = 0,002 \times D + 0,002 \times Dc$$

Sendo D a distância entre os *smart meters* e os agregadores e Dc a distância entre os agregadores e o sistema central.

Tabela 10 - Resultados da D/2000-200 com limitação de 1 hora para o solver

Teste	Tempo de Execução (h:min:s:cs)	Nº de agregadores instalados	Solução ótima	Gap (%)	Total de Capacidade	Total de Fluxo
1	01:00:08:02	64	1 052,725	1,59	150 903	49 962
2	01:00:07:71	62	1 034,534	1,56	150 501	50 039
3	01:00:08:45	64	1 052,115	1,94	149 604	50 099
4	01:00:07:98	63	1 063,437	2,17	149 256	49 579
5	01:00:08:10	63	1 056,888	1,43	149 242	50 116
6	01:00:07:55	63	1 041,483	2,06	151 638	50 109
7	01:00:13:13	62	1 024,638	1,32	150 478	49 760
8	01:00:08:17	62	1 038,064	1,34	150 551	50 023
9	01:00:08:62	64	1 061,844	1,41	150 417	50 179
10	01:00:08:02	62	1 044,640	2,20	151 179	50 135
<b>Média</b>	01:00:08:06	63	1 048,400	1,58	150 490	50 069
<b>Desvio Padrão</b>	00:00:01:63	0,88	12,555	0,35	796,51	189,66

### E/2000-200:

Em E/2000-200 é testado o modelo E, no qual é utilizada a tecnologia PLC para estabelecer a transmissão de dados.

Neste modelo os custos de transferência de dados não são contabilizados porque se assume que o PLC já existe na rede elétrica, não existindo gastos na instalação da tecnologia.

Foi definida uma distância máxima de 1500 metros. Este valor foi baseado no estudo de (Sangsuwan, Thepphaeng, & Pirak, 2014). As instâncias cuja distância *smart meter* - agregador e a distância agregador - sistema central ultrapassem a distância máxima definida não são contabilizadas.

Por não se considerarem os custos de transferência, este problema é mais simples do que os restantes, pelo que, em alguns testes (por exemplo, teste 1), o CPLEX pára antes de atingir 1 hora de execução. Nestes casos, é ativado outro critério de paragem – *gap*, que por *default* está fixado em 0,01%

Tabela 11 - Resultados da E/2000-200 com limitação de 1 hora para o solver

Teste	Tempo de Execução (h:min:s:cs)	Nº de agregadores instalados	Solução ótima	Gap (%)	Total de Capacidade	Total de Fluxo
1	00:22:07:30	59	548,700	0,01	150 903	49 962
2	00:01:06:84	59	548,700	0,01	150 501	50 039
3	01:00:11:80	60	558,000	1,74	149 604	50 099
4	01:00:10:51	59	548,700	2,09	149 256	49 579
5	01:00:22:16	65	604,500	10,15	149 242	50 116
6	00:49:09:18	59	548,700	0,01	151 638	50 109
7	01:00:10:94	59	548,700	1,98	150 478	49 760
8	00:01:11:10	59	548,700	0,01	150 551	50 023
9	01:00:08:79	60	558,000	2,19	150 417	50 179
10	00:00:57:14	59	548,700	0,01	151 179	50 135
<b>Média</b>	00:54:39:00	59	548,700	0,88	150 490	50 069
<b>Desvio Padrão</b>	00:27:45:00	1,84	17,426	3,09	796,51	189,66

### **F/2000-200:**

No caso F/2000-200 o modelo utilizado é o F, no qual é utilizada tecnologia WIMAX para a transmissão de informação entre os *smart meters* e os agregadores e entre os agregadores e o sistema central. Como tal, os custos de transferência contabilizam os custos associados à transferência de informação entre os *smart meters* e os agregadores e a transferência de informação entre os agregadores e o sistema central.

$$\text{Custos de transferência} = 0,0012 \times D + 0,0012 \times Dc$$

sendo D a distância entre os *smart meters* e os agregadores e Dc a distância entre os agregadores e o sistema central.

Foi definida uma distância máxima de 1000 metros. Este valor foi baseado no estudo de (Ibuomo R. Tebepah, 2017). As instâncias cuja distância *smart meter* - agregador e a distância agregador - sistema central ultrapassem a distância máxima definida não são contabilizadas.

Tabela 12 - Resultados da F/2000-200 com limitação de 1 hora para o solver

Teste	Tempo de Execução (h:min:s:cs)	Nº de agregadores instalados	Solução ótima	Gap (%)	Total de Capacidade	Total de Fluxo
1	01:00:09:06	62	874,155	1,25	150 903	49 962
2	01:00:10:54	62	878,350	1,19	150 501	50 039
3	01:00:13:35	63	873,956	1,66	149 604	50 099
4	01:00:09:37	62	875,505	1,55	149 256	49 579
5	01:00:14:16	62	866,956	1,28	149 242	50 116
6	01:00:09:26	62	862,475	1,46	151 638	50 109
7	01:00:11:73	62	857,940	1,72	150 478	49 760
8	01:00:12:57	62	865,415	1,67	150 551	50 023
9	01:00:13:17	62	877,217	1,42	150 417	50 179
10	01:00:13:24	62	862,230	1,53	151 179	50 135
<b>Média</b>	01:00:12:15	62	870,456	1,50	150 490	50 069
<b>Desvio Padrão</b>	00:00:01:94	0,32	7,260	0,19	796,51	189,66

O modelo G é o alvo de estudo nas próximas quatro experiências (G/1000-100, G/2000-200, G/5000-400 e G/10000-450). Tal como já foi referido no capítulo anterior, este modelo é híbrido, isto é, há a possibilidade de coexistirem tecnologias com e sem fios. Assim, este modelo define qual a tecnologia utilizada em cada ligação *smart meter* – agregador, sendo esta escolha independente da tecnologia que liga esse mesmo agregador ao Sistema Central, que também é definida pelo modelo. As tecnologias com e sem fios escolhidas foram fibra ótica e WIMAX, respetivamente.

O custo de transferência estabelecido para WIMAX é de 0,0012 unidades por metro e a distância máxima foi fixada em 1000 metros. O custo de transferência definida para a fibra ótica é 0,002 unidades por metro e a distância máxima é 2000 metros.

Os fluxos gerados pelos *smart meters* são definidos por uma distribuição uniforme com variação [0 30], enquanto as capacidades dos agregadores são definidas por uma distribuição uniforme com variação [600 900].

Definiu-se também que o custo o custo de instalação dos agregadores é independente da capacidade e da tecnologia a ele associada, sendo estabelecido em 9,3 unidades.

Tal como nas experiências anteriores, existe uma borda lateral, ao longo de toda a área com 50 metros de largura na qual não existem locais potenciais para a instalação de agregadores. Considerou-se ainda que o Sistema Central se encontra numa área central de 100×100 metros.

### G/1000-100

As dimensões nesta experiência são 1000 *smart meters* e 100 locais. Os *smart meters* estão distribuídos por uma área de 885×885 metros e os agregadores estão distribuídos numa área central de 785×785 metros. A figura A4 encontra-se em anexo e ilustra a distribuição dos *smart meters* e dos agregadores no espaço. Os resultados de G/1000-100 estão na tabela 13.

Tabela 13 - Resultados da G/1000-100 com limitação de 1 hora para o solver

Teste	Tempo de Execução (h:min:s:cs)	Nº de agregadores instalados		Ligações entre smart meters e agregadores		Solução ótima	Gap (%)	Total de Capacidade	Total de Fluxo
		WIMAX	Fibra Ótica	Fibra Ótica	WIMAX				
1	01:00:10:52	30	0	0	1000	376,480	0,17	75 312	24 890
2	01:00:08:63	30	0	0	1000	373,608	0,93	76 083	24 887
3	01:00:08:16	31	0	0	1000	387,602	0,52	74 961	24 975
4	01:00:07:99	31	0	0	1000	391,897	0,75	74 388	24 789
5	01:00:08:56	30	0	0	1000	381,819	0,58	74 270	25 041
6	01:00:07:20	30	0	0	1000	372,040	0,79	76 906	24 939
7	01:00:09:87	30	0	0	1000	376,169	0,95	75 271	24 917
8	01:00:09:66	31	0	0	1000	383,014	1,43	74 394	24 949
9	01:00:08:38	31	0	0	1000	391,410	0,92	76 194	25 155
10	01:00:10:07	30	0	0	1000	376,292	0,48	75 604	25 140
<b>Média</b>	01:00:09:00	30	0	0	1000	379,150	0,75	75 292	24 944
<b>Desvio Padrão</b>	00:00:01:07	0,52	0	0	0	7,275	0,40	875,51	114,71

### G/2000-200

Em G/2000-200, existem 2000 *smart meters* e 200 locais. Para este caso, a área é de 1770×1770 metros e os locais potenciais para a instalação de agregadores estão distribuídos numa área central de 1670×1670 metros. A figura A5 encontra-se em anexo e ilustra essa mesma distribuição. Os resultados de G/2000-200 estão na tabela 14.

Tabela 14 - Resultados da G/2000-200 com limitação de 1 hora para o solver

Teste	Tempo de Execução (h:min:s:cs)	Nº de agregadores instalados		Ligações entre smart meters e agregadores		Solução ótima	Gap (%)	Total de Capacidade	Total de Fluxo
		WIMAX	Fibra Ótica	Fibra Ótica	WIMAX				
1	01:00:19:80	59	4	0	2000	865,899	1,27	150 903	49 962
2	01:00:18:90	57	6	0	2000	864,423	2,60	150 501	50 039
3	01:00:19:05	58	4	0	2000	859,346	1,00	149 604	50 099
4	01:00:17:96	59	3	0	2000	864,574	1,26	149 256	49 579
5	01:00:19:35	60	2	0	2000	865,487	1,35	149 242	50 116
6	01:00:16:69	59	2	0	2000	848,827	0,98	151 638	50 109
7	01:00:17:41	58	3	0	2000	843,091	1,21	150 478	49 760
8	01:00:18:88	57	4	0	2000	850,370	0,95	150 551	50 023
9	01:00:18:32	60	2	0	2000	867,156	0,99	150 417	50 179
10	01:00:20:55	57	4	0	2000	851,817	1,15	151 179	50 135
<b>Média</b>	01:00:18:89	58,50	3,50	0	2000	861,885	1,18	150 490	50 069
<b>Desvio Padrão</b>	00:00:01:13	1,2	1,3	0	0	8,764	0,49	796,51	189,66

#### G/5000-400

No caso G/500-400, as dimensões do modelo são 5000 smart meters e 400 locais. A área é de 4425×4425 metros e os locais estão distribuídos numa área central de 4325×4325 metros, visível na figura A6 presente em anexo.

Tabela 15 - Resultados da G/5000-400 com limitação de 1 hora para o solver

Teste	Tempo de Execução (h:min:s:cs)	Nº de agregadores instalados		Ligações entre smart meters e agregadores		Solução ótima	Gap (%)	Total de Capacidade	Total de Fluxo
		WIMAX	Fibra Ótica	Fibra Ótica	WIMAX				
1	01:01:20:60	24	44	0	5000	1 816,458	0,30	302 181	125 043
2	01:01:14:55	28	35	0	5000	1 735,741	0,28	298 078	125 026
3	01:01:22:21	30	36	0	5000	1 770,046	0,34	300 202	124 998
4	01:01:16:55	29	34	0	5000	1 724,413	0,16	297 339	124 778
5	01:01:19:37	27	37	0	5000	1 760,970	0,18	301 934	125 007
6	01:01:16:34	29	35	0	5000	1 750,781	0,21	300 299	125 005
7	01:01:21:57	28	39	0	5000	1 775,739	0,28	299 400	124 752
8	01:01:16:63	25	41	0	5000	1 776,414	0,23	300 907	124 863
9	01:01:18:62	28	39	0	5000	1 822,538	0,28	300 411	125 249
10	01:01:18:48	28	38	0	5000	1 788,515	0,20	300 925	124 929
<b>Média</b>	01:01:18:55	28	37,5	0	5000	1 772,900	0,26	300 355	125 000
<b>Desvio Padrão</b>	00:00:02:49	1,8	3,1	0	0	31,608	0,06	1 539,40	144,13

## G/10000-450

Por último, nesta experiência existem 10 000 smart meters distribuídos numa área de 7000×7000 metros e 450 locais distribuídos numa área central de 6900×6900 metros, visível na figura A7 presente em anexo. Os resultados de G/10000-450 encontram-se na tabela 16.

Tabela 16 - Resultados da G/10000-450 com limitação de 1 hora para o solver

Teste	Tempo de Execução (h:min:s:cs)	Nº de agregadores instalados		Ligações entre smart meters e agregadores		Solução ótima	Gap (%)	Total de Capacidade	Total de Fluxo
		WIMAX	Fibra Ótica	Fibra Ótica	WIMAX				
1	01:03:01:15	21	39	0	10 000	2 945,049	0,07	338 860	250 476
2	01:03:02:23	22	33	0	10 000	2 841,885	0,04	336 275	250 281
3	01:02:59:53	20	33	0	10 000	2 808,456	0,05	337 359	249 473
4	01:02:50:55	24	34	0	10 000	2 901,150	0,08	334 835	249 706
5	01:02:56:47	21	35	0	10 000	2 858,608	0,07	338 882	250 032
6	01:02:52:45	19	36	0	10 000	2 864,947	0,07	338 587	250 040
7	01:02:58:62	22	33	0	10 000	2 863,526	0,05	337 412	249 950
8	01:02:52:52	23	35	0	10 000	2 901,746	0,05	338 236	249 473
9	01:02:50:72	19	35	0	10 000	2 929,380	0,04	337 618	249 968
10	01:02:45:47	24	28	0	10 000	2 893,849	0,06	339 205	249 991
<b>Média</b>	01:02:54:49	21,5	34,5	0	10 000	2 879,400	0,06	337 927	249 980
<b>Desvio Padrão</b>	00:00:05:45	1,8	2,8	0	0	41,233	0,01	1 354,8	319,1

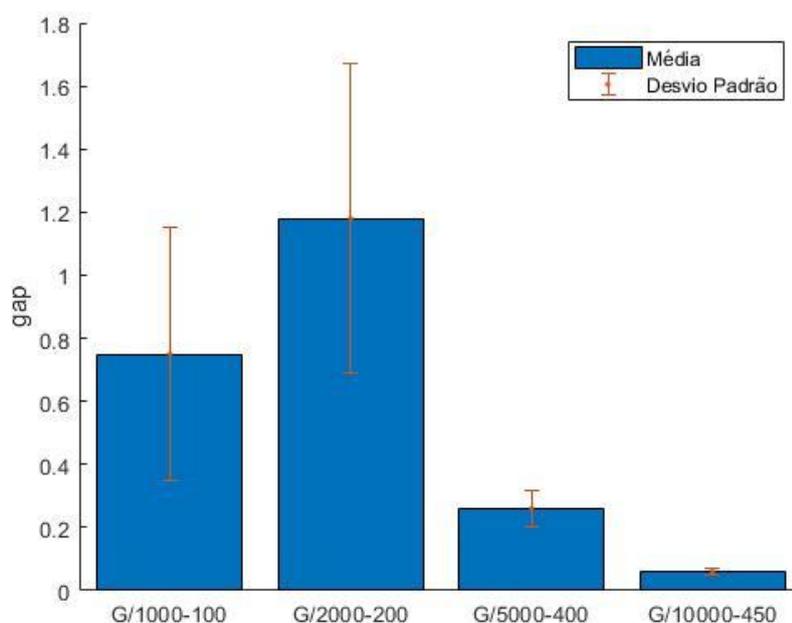


Figura 12 - Ilustração da média e desvio padrão dos gaps de G/1000-100, G/2000-200, G/5000-400 e G/10000-450

Nas últimas quatro experiências não existem ligações estabelecidas por fibra ótica entre *smart meters* e agregadores, sendo todas elas estabelecidas por *WIMAX*. Tendo em conta que, por metro, a fibra ótica é mais cara, é natural que todas as ligações sejam estabelecidas pela tecnologia sem fios para que haja minimização dos custos de transferência. O modelo só opta pela tecnologia com fios em situações que é mais vantajoso, ao nível do custo, estabelecer ligações com um comprimento acima dos 1000 metros, não sendo possível utilizar *WIMAX* visto que esta tecnologia tem uma limitação de distância fixada nos 1000 metros. São exemplo disso algumas das ligações entre agregadores e o Sistema Central.

À medida que as dimensões do modelo vão aumentando, e conseqüentemente as dimensões da área, o número de ligações agregador – Sistema Central estabelecidas por fibra ótica aumenta, isto porque a limitação de distância da fibra é menos restritiva (2000 metros). No entanto, continuam a não existir ligações *smart meter* – agregador estabelecidas por *WIMAX*, porque, por uma questão de minimização dos custos de transferência, os *smart meters* estão próximos espacialmente do agregador a que estão ligados.

Na figura 12 é possível comparar as médias e os desvios padrão dos *gaps* das quatro experiências. Por ativação das restrições de distância para os problemas de maior dimensão (G/5000-400 e G/10000-450), a região admissível é menor. Este facto justifica a redução das médias e dos desvios padrão do *gap* à medida que as dimensões do problema vão aumentando.

Tal como se pode observar na figura 13, para as mesmas dimensões (*smart meter* × locais), as médias e desvios padrão do *gap* são menores para o modelo G, comparativamente ao modelo A. Essa diferença torna-se cada vez mais significativa à medida que as dimensões vão aumentando. A razão é que as limitações de distância existentes no modelo G diminuem a região admissível, sendo possível, com este modelo, numa hora de execução, chegar a uma solução com maior precisão. Para as duas primeiras dimensões (1000×100 e 2000×200), os valores estatísticos do *gap* não diferem muito entre os dois modelos porque as limitações de distância do modelo G não são muito influentes. Se se considerar os casos G/1000-100 e A/1000-100, a área é 885×885 metros, pelo que as limitações de distância não têm qualquer influência (não há nenhuma ligação, de entre as possíveis, que ultrapasse os 1000 metros). No caso de G/2000-200 e A/2000-200, a área é 1770×1770 metros e a limitação de distância de *WIMAX* tem influência; no entanto, não há nenhuma ligação que ultrapasse os 2000 metros (limite de distância de fibra ótica).

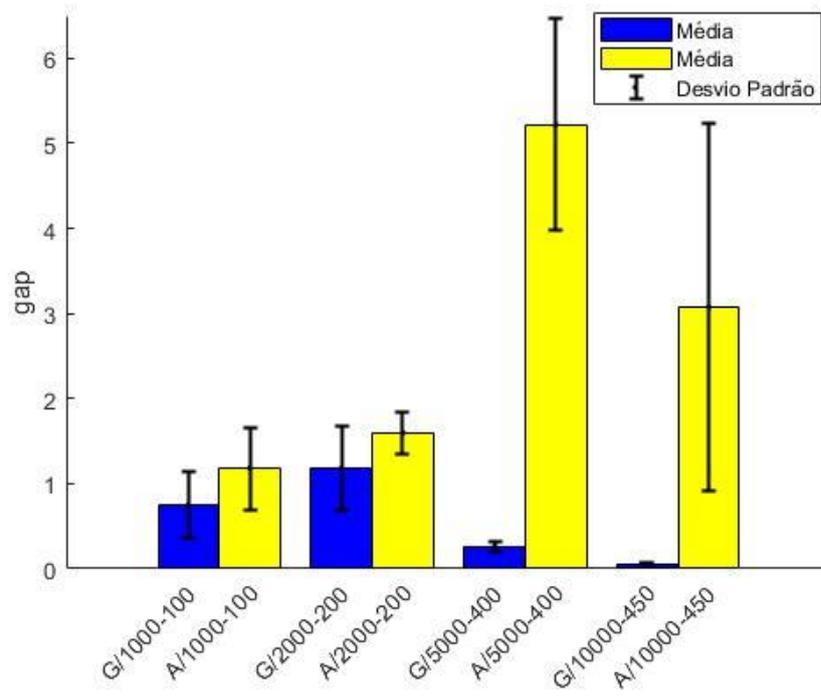


Figura 13 - Médias e desvios padrão dos gaps das experiências do modelo A e do modelo G

## 6. Algoritmo Genético

Este capítulo descreve a implementação de uma meta-heurística, como alternativa para resolver o problema da localização de agregadores na Smart Grid. A opção recaiu sobre os Algoritmos Genéticos (AGs), devido às suas vantagens para tratar de problemas de natureza combinatória.

Os algoritmos genéticos são métodos de pesquisa estocásticos baseados na Teoria da Evolução das Espécies, em que os indivíduos/soluções mais aptos ao ambiente/problema sobrevivem, sendo modificados ao longo do processo evolutivo por operadores de seleção, cruzamento e mutação. O objetivo dos AGs é encontrar uma solução de boa qualidade, se possível a ótima, para o problema em causa num tempo de computação aceitável.

As etapas habituais que compõem um AG são mostradas na figura 14 e, posteriormente, é feita uma descrição da implementação realizada.

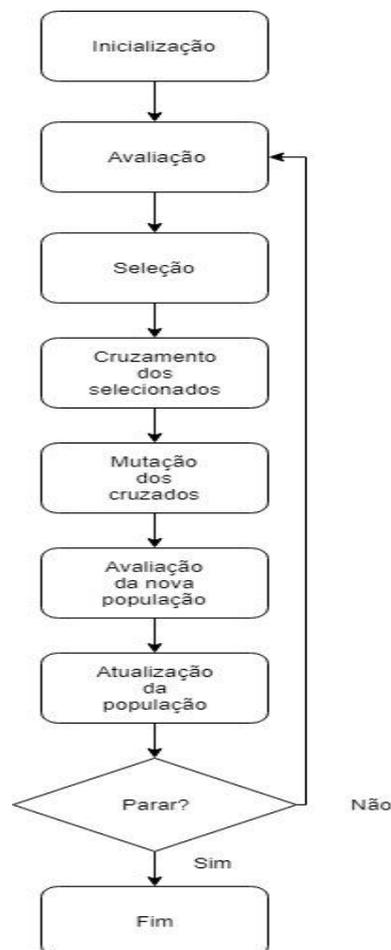


Figura 14 - Fluxograma de um Algoritmo Genético

- **Inicialização**

Os algoritmos genéticos começam por criar um conjunto de indivíduos que compõem uma população. Cada indivíduo representa uma solução para o problema a ser tratado.

Nesta etapa, é definida uma forma de representação das soluções, a partir da qual é definida a estrutura de dados que será utilizada para compor cada cromossoma. A codificação/representação toma, em geral, o nome de genótipo e as soluções propriamente ditas (genótipos decodificados), designam-se por fenótipo. Os AGs processam os genótipos.

- **Tratamento de Soluções Inválidas**

Na geração de cada indivíduo há a possibilidade do genótipo representar uma solução inválida, uma vez que, no processo de codificação, não existe nenhum mecanismo que garanta o cumprimento das restrições do problema.

Existem várias alternativas para tratar soluções não admissíveis: técnicas de penalização, de reparação ou de alteração da representação de forma a garantir que as restrições não sejam violadas.

- **Avaliação**

A função de avaliação é aplicada a cada indivíduo e define a qualidade de cada solução.

Geralmente, a função de avaliação consiste na função objetivo, eventualmente modificada, do problema.

No caso de se optar por um mecanismo de penalização de soluções não admissíveis, o termo de penalidade pode ser incluído na função de avaliação.

- **Seleção**

É através deste mecanismo que são selecionados os indivíduos que vão ser os progenitores no processo de reprodução, ou seja, os pais dos indivíduos da geração seguinte.

Existem diferentes tipos de seleção: seleção por *ranking* – os indivíduos são ordenados consoante o seu valor de função de avaliação e a possibilidade de serem escolhidos depende da sua posição na tabela classificativa; seleção por torneio – são formados, de forma aleatória, subgrupos a partir da população e o indivíduo com melhor valor de avaliação dentro desse subgrupo é selecionado; seleção uniforme – não há qualquer interferência por parte da função de avaliação na seleção, pelo que, todos os indivíduos têm a mesma probabilidade de serem selecionados.

- **Operadores Genéticos**

Os operadores genéticos destinam-se a criar filhos (descendentes) a partir dos seus progenitores, incluindo cruzamento e mutação. É por meio destes operadores, em conjunto com a seleção, que é possível a evolução da população de geração em geração.

- **Cruzamento**

Neste operador, os indivíduos selecionados anteriormente são agrupados, em geral, aos pares e cruzados, efetuando-se troca de material genético entre cada par. De seguida é definido, aleatoriamente, um (ou vários) ponto de corte ao longo do cromossoma dos progenitores. Mediante esse ponto os cromossomas de cada indivíduo ficam divididos em duas partes. As quatro partes de cromossomas são recombinadas dando origem a dois filhos, conforme ilustrado na figura 15.

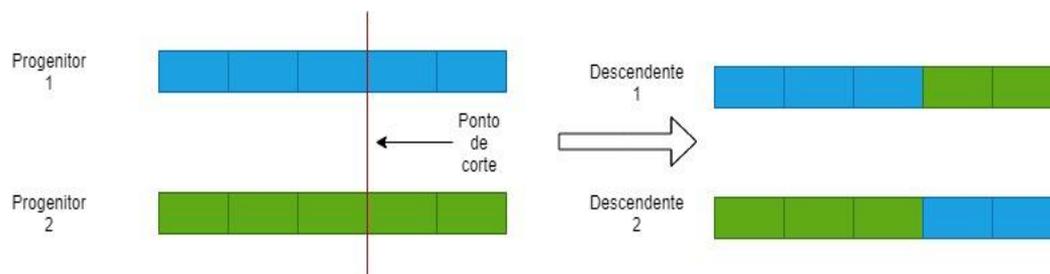


Figura 15 - Cruzamento com um ponto de corte (imagem adaptada de (Gaspar-Cunha, Antunes, & Takahashi, 2012))

- **Mutação**

A mutação consiste na troca de um ou mais genes no cromossoma de um indivíduo. Tanto os genes que são trocados como o indivíduo que sofre mutação são selecionados aleatoriamente, a partir dos indivíduos cruzados. Este operador confere diversidade e aleatoriedade à população. Este operador faz alguma “perturbação”, da pesquisa, evitando que fique presa num ótimo local.

- **Estratégias Evolucionárias**

As estratégias evolucionárias servem para definir quais os indivíduos que farão parte da próxima geração. Existem diferentes tipos de estratégias, tais como:

- **Estratégia Geracional:**

Os indivíduos que farão parte da nova geração são gerados por meio dos operadores genéticos (cruzamento e mutação). Nenhum indivíduo da população anterior passará diretamente para a nova;

- Estratégia Elitista:

É selecionada uma pequena percentagem de indivíduos da população anterior para passarem diretamente para a nova geração. Os indivíduos escolhidos neste processo correspondem aos que apresentam melhores valores da função de avaliação. Os restantes indivíduos que compõem a nova geração são resultantes da mutação e do cruzamento;

- Estratégia *Steady State*:

É gerado apenas um indivíduo no cruzamento ou na mutação, que passará a fazer parte da nova geração. Os restantes indivíduos que compõem a nova geração correspondem aos indivíduos da geração anterior que passam diretamente para a nova;

- **Critério de Paragem**

O critério de paragem pode assumir várias formas:

- quando não for atingida melhoria no valor da função de avaliação ao fim de um determinado número de iterações estipulado;
- quando é atingido um número pré-definido de iterações;
- quando é atingido um tempo limite pré-definido; (Gaspar-Cunha, Antunes, & Takahashi, 2012) e (McCall, 2005)

## 6.1. Algoritmo Genético Implementado

Nesta secção pretende-se, de uma forma detalhada, relatar as especificações do algoritmo genético implementado nesta dissertação. Para analisar o desempenho do AG implementado, considerou-se um problema cujo cenário corresponde ao modelo A com 1000 *smart meters* e 100 locais para a instalação de agregadores.

- **Inicialização**

Cada geração é constituída por 40 indivíduos.

Cada cromossoma é constituído por 1000 genes, o número de *smart meters*. Cada gene (célula do vetor) é preenchido, de forma aleatória, com um número inteiro de 1 até 100, sendo 100 o número de locais para a instalação de agregadores. Assim, cada indivíduo é representado por uma sequência de 1000 números inteiros de 1 a 100. Os locais são selecionados aleatoriamente. Para cada agregador, correspondente ao local selecionado, por meio de um mecanismo implementado, é garantido que a sua capacidade seja utilizada tanto quanto possível. A capacidade remanescente de cada agregador depois das ligações a ele serem efetuadas é a mínima possível, ainda que maior do que 0, assegurando que a capacidade do agregador não é excedida

pelos fluxos que recebe. Assim, esta forma de estabelecer ligações garante o cumprimento da restrição de capacidade. A seleção de locais termina quando todos os *smart meters* estiverem ligados a um agregador.

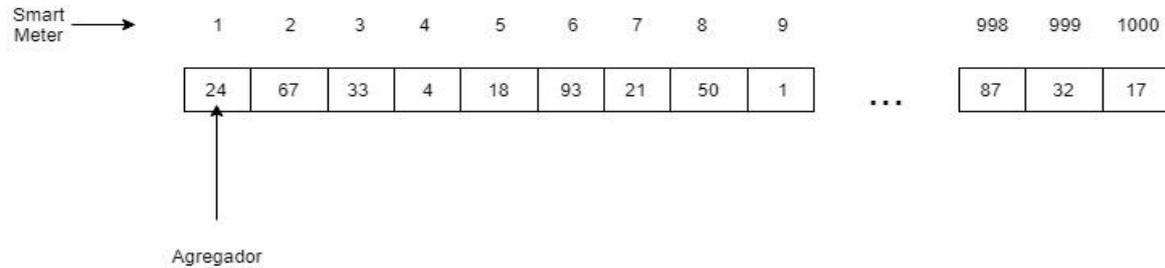


Figura 16 - Exemplo de um cromossoma de um indivíduo

A representação escolhida garante o cumprimento da restrição que assegura que todos os *smart meters* estão ligados a um agregador, uma vez que, todas as células do vetor estão por preenchidas.

- **Avaliação dos indivíduos**

Nesta fase é avaliada a aptidão de cada indivíduo de uma população para o problema da localização de agregadores na *Smart Grid*.

Como o problema em causa é de minimização, valores mais baixos de avaliação correspondem a indivíduos melhores.

O valor da função de avaliação é calculado pela adição dos custos de transferência e os custos de instalação ( $9,3 \times n^\circ$  de agregadores instalados).

$$\text{Valor de Avaliação} = \text{Custo de Instalação} + \text{Custo de Transferência}$$

Depois da avaliação feita, os indivíduos são organizados por ordem crescente do valor da função de avaliação.

- **Seleção**

O método de seleção adotado é o torneio binário. Ou seja, para determinar cada progenitor são selecionados de forma aleatória 2 indivíduos da população e o que tiver menor valor da função de avaliação passa a progenitor da geração seguinte.

- **Cruzamento**

São selecionados  $N_c$  indivíduos para cruzamento, com:

$$N_c = p_c \times n^\circ \text{ total de indivíduos de uma geração}$$

sendo,  $p_c$  a probabilidade de cruzamento (Parâmetro do AG).

Os indivíduos selecionados para serem progenitores da geração seguinte são agrupados aos pares para se cruzarem. São selecionados aleatoriamente, genes do progenitor 1 para serem cruzados com genes do progenitor 2. São selecionados  $N_{tc}$  genes, com

$$N_{tc} = tc \times n^{\circ} \text{ de genes num cromossoma}$$

sendo  $tc$  a taxa de genes cruzados (parâmetro do AG).

Para cada gene do progenitor 1 selecionado para cruzamento (ao qual corresponde um certo fluxo), é inspecionado o cromossoma do progenitor 2 e, caso exista algum gene que possua igual valor de fluxo comparativamente ao gene do progenitor 1, é efetuada a troca entre os agregadores que estão ligados aos genes em questão. No caso de a troca efetuada violar a restrição de capacidade para um dado agregador, ao valor de avaliação do indivíduo é acrescentada uma penalização, cujo valor corresponde a 1000 vezes o valor excedido por parte da soma dos fluxos ligados ao agregador relativamente à sua capacidade.

- **Mutação**

Neste operador são selecionados  $N_m$  indivíduos para serem mutados, com:

$$N_m = p_m \times n^{\circ} \text{ total de indivíduos da geração};$$

sendo  $p_m$  a probabilidade de um indivíduo ser mutado (parâmetro do AG).

No cromossoma de cada indivíduo selecionado para mutação são definidos aleatoriamente  $N_{tm}$  genes para serem mutados, com

$$N_{tm} = tm \times \text{tamanho do cromossoma}$$

sendo  $tm$  a taxa de genes mutados (parâmetro do AG).

A posição dos  $N_{tm}$  genes é definida aleatoriamente. Assim que a posição é definida, para cada gene (tendo associado um fluxo) são registados todos os genes com igual fluxo, ao longo de todo o cromossoma. Para todos estes genes registados é avaliada se uma eventual troca do seu agregador com o agregador do gene selecionado é vantajosa por representar uma redução dos custos de transferência. De entre todas as trocas possíveis é selecionada a troca de agregadores mais vantajosa.

Para facilitar a compreensão do operador de mutação implementado, imagine-se o seguinte exemplo: o *smart meter* 10 está ligado ao agregador 65 e gera um fluxo igual a 25. O passo seguinte consiste em pesquisar no cromossoma todos os *smart meters* que gerem um fluxo igual a 25. Obteve-se 2 *smart meters* com igual fluxo – o *smart meter* 20 ligado ao agregador 31 e o *smart meter* 30 ligado ao agregador 47. Para estes dois *smart meters* (20 e 30) é avaliada se uma eventual troca de agregadores com o *smart meter* 10 reduz os custos de transferência - o *smart meter* 10 ficar ligado ao agregador 31 e o *smart meters* ficar ligado ao agregador 65

(no caso de haver troca entre o *smart meter* 10 e 20); ou o *smart meter* 10 ficar ligado ao agregador 47 e o *smart meter* 30 ficar ligado ao agregador 65 (no caso de haver troca entre o 10 e o 30). Se alguma das trocas for vantajosa, é efetuada.

- **Estratégia Evolucionária**

Os dois melhores indivíduos da população que iniciou a iteração são isolados e não são sujeitos aos processos descritos. Estes indivíduos compõem o conjunto elite.

Os indivíduos resultantes da mutação e do cruzamento são avaliados e adicionados a todos os indivíduos da população que iniciou a iteração. Este grande grupo (indivíduos mutados + cruzados + indivíduos da população inicial da iteração + elite) são organizados por ordem crescente de valor da função de avaliação e passam para a geração seguinte os 40 melhores indivíduos.

- **Critério de Paragem**

Como critério de paragem foi definido um número limite de gerações/iterações.

Para evitar que a pesquisa fique presa em ótimos locais de baixa qualidade, é aplicada uma estratégia de reajuste das probabilidades dos operadores genéticos. Se for atingido um número de iterações igual a 5 sem que sejam registadas melhorias na melhor solução encontrada até ao momento, as probabilidades de cruzamento e mutação sobem substancialmente.

## 6.2. Resultados do Algoritmo Genético implementado

Nesta secção pretende-se relatar os resultados obtidos com a implementação do Algoritmo Genético descrito na secção 6.1. Na tabela 17 encontram-se descritos os parâmetros de entrada definidos. Na tabela 18 estão descritos os parâmetros dos operadores genéticos do AG.

Tabela 17 - Descrição dos parâmetros de entrada do AG

Parâmetros de Entrada do AG	
Dimensões da área de análise	885 × 885 m <sup>2</sup>
Nº de <i>smart meters</i> /genes	1000
Nº de locais	100
Número de indivíduos numa geração	40
Custo de instalação de agregador	9,3
IF (Intervalo de valores dos fluxos dos <i>smart meters</i> )	20 a 30
IC (Intervalo de valores das capacidades dos agregadores)	600 a 900
Número de iterações/gerações	1000
Tamanho do torneio	2
Número de indivíduos selecionados para a Elite	2

Tabela 18 - Descrição dos parâmetros dos Operadores genéticos do AG

Parâmetros dos Operadores Genéticos do AG	
$p_c$ (Probabilidade de cruzamento)	0,7
$N_c$ (Número de progenitores)	28
$tc$ (Taxa de genes cruzados)	0,1
$N_{tc}$ (Número de genes cruzados num cromossoma)	100
$p_m$ (Probabilidade de mutação)	0,1
$N_m$ (Número de indivíduos mutados)	4
$tm$ (Taxa de genes mutados)	0,1
$N_{tm}$ Número de genes mutados num cromossoma	100

Tal como foi descrito na secção 6.1, se a melhor solução se mantiver constante ao longo de 5 iterações os parâmetros dos operadores genéticos na geração seguinte aumentam substancialmente para que seja introduzida variabilidade na população, evitando que a pesquisa fique presa num ótimo local. Assim, caso essa estagnação ocorra, verificam-se as seguintes alterações:

Parâmetros dos operadores	Parâmetros alterados dos operadores
$p_c \rightarrow 0,7$	0,9
$N_c \rightarrow 28$	36
$tc \rightarrow 0,1$	0,5
$N_{tc} \rightarrow 100$	500
$p_m \rightarrow 0,1$	0,7
$N_m \rightarrow 4$	28
$tm \rightarrow 0,1$	0,7
$N_{tm} \rightarrow 100$	700

Tal como se pode observar na tabela 19, os resultados do AG implementado estão distantes dos resultados obtidos no *CPLEX* (tabela 3). No AG, os cromossomas dos indivíduos da população inicial contêm um número relativamente reduzido de agregadores diferente, cerca de 35, uma vez que é garantido que a capacidade de cada agregador instalado é praticamente toda utilizada. Esse número não sofre alterações significativas ao longo das gerações, visto que os operadores genéticos implementados só permitem reduzir significativamente os custos associados à transferência de informação. Para que o algoritmo atingisse soluções próximas das ótimas, seria necessário implementar o mecanismo que garantisse a redução de agregadores diferentes presentes num cromossoma.

Tabela 19 - Resultados do Algoritmo Genético Implementado

Teste	Tempo de Execução (min:s:cs)	Solução ótima
1	1:39:58	655,45
2	1:48:00	672,11
3	1:40:99	669,95
4	1:49:10	645,81
5	1:41:49	654,18
6	1:53:83	659,28
7	1:44:28	643,64
8	1:49:87	647,75
9	1:39:62	648,63
10	1:47:93	655,91
<b>Média</b>	1:46:11	654,82
<b>Desvio Padrão</b>	0:05:94	9,67

Na figura 17 é ilustrada a variação da melhor solução alcançada ao longo das 1000 gerações. Esta variação deve-se, maioritariamente, a reduções no custo de transferência de informação.

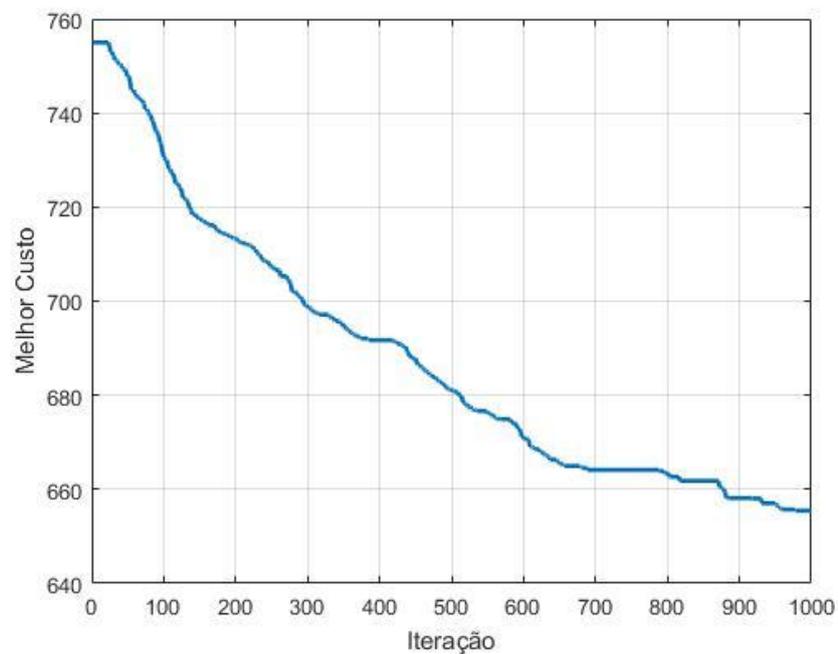


Figura 17 - Variação da melhor solução alcançada pelo AG ao longo das 1000 gerações

Devido à limitação temporal, não foi possível melhorar o algoritmo de modo a que os seus resultados se aproximassem dos resultados dados pelo solver *CPLEX*. Acredita-se que se fosse implementado um mecanismo, no operador de cruzamento, que privilegiasse a instalação de agregadores com maior capacidade em detrimento dos restantes, possivelmente a pesquisa evoluiria no sentido de reduzir o número de agregadores diferentes instalados.

## 7. Conclusão

Nesta dissertação são apresentadas duas metodologias para definir a localização ótima de agregadores em Smart Grids. Para este efeito, foram desenvolvidos modelos de programação matemática para diferentes problemas, os quais foram tratados com uma abordagem exata, por meio do *IBM Ilog CPLEX Optimization Studio*, e uma abordagem meta-heurística – Algoritmo Genético, com recurso ao software Matlab.

Foram tratados sete cenários (modelos A a G), com o *CPLEX*. Os resultados dos vários modelos foram comparados, sendo possível analisar a influência das características particulares de cada cenário.

Com a abordagem meta-heurística, foi apenas simulado o cenário correspondente ao modelo A. No entanto, os resultados obtidos não são próximos dos ótimos (alcançados com a abordagem exata) porque não é conseguida a redução significativa do número de agregadores instalados ao longo das gerações. Apesar desta abordagem obter soluções que não violam as restrições do modelo A por limitação de tempo não foi possível melhorar o algoritmo para que os resultados obtidos fossem mais próximos dos ótimos.

## Referências

- National Energy Technology Laboratory. (2008 ). Advanced Metering Infrastructure. *NETL Modern Grid Strategy Powering our 21st-Century Economy*.
- Aalamifar, F., Shirazi, G. N., Noori, M., & Lampe, L. (2014). Cost-Efficient Data Aggregation Point Placement for Advanced Metering Infrastructure. *IEEE International Conference on Smart Grid Communications*.
- Almeida, W. G., Senne, E. L., & Yanasse, H. H. (2012). Uma solução exata para o Problema de Localização de Concentradores com Alocação Múltipla.
- Campbell, J. F., & O'Kelly, M. E. (2012). Twenty-Five Years of Hub Location Research. *Transportation Science*, 153-295.
- Eletric Light & Power. (1 de 10 de 2008). AMR vs AMI. Obtido de Eletric Light & Power: [https://www.elp.com/articles/powergrid\\_international/print/volume-13/issue-10/features/amr-vs-ami.html](https://www.elp.com/articles/powergrid_international/print/volume-13/issue-10/features/amr-vs-ami.html)
- Eroğlu, E., & Keskintürk, T. (2016). Warehouse Location Problem With Genetic Algorithm. *35th International Conference on Computers and Industrial Engineering*.
- Gaspar-Cunha, A., Antunes, C. H., & Takahashi, R. (2012). Manual de Computação Evolutiva e Metaheurística. 141- 466.
- Guo, Y., Liang, Y., & Guo, J. (2016). Concentrator placement for SDN-based smart power communication systems. *2016 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops)*, 27-29.
- Hao, J. (9 de Abril de 2014). Data Concentrators are Key to Engineering a Smarter Grid. Obtido de EECatalog: <http://eecatalog.com/smart-energy/2014/04/09/data-concentrators-are-key-to-engineering-a-smarter-grid/>
- Huang, X., & Wang, S. (2015). Aggregation Points Planning in Smart Grid Communication System. *IEEE Communications Letters*, 1315-1318.
- Ibuomo R. Tebepah. (2017). WiMAX for Online Service Transmission. *International Journal of Networks and Communications*, 55-62.
- Jaramillo, J. H., Bhadury, J., & Batta, R. (2002). On The Use of Genetic Algorithms to Solve Location Problems. *Computers and Operations Research*, 761 - 779.
- Karimi, H., & Bashiri, M. (2011). Hub covering location problems with different coverage types. *Scientia Iranica*, 1571-1578.
- Karp, R. M. (1972). Reducibility Among Combinatorial Problems. *Springer*, 85-103.
- Matos, L., Gonçalves, L., Seca, L., & Mendes, C. (2017). Smart Grids. *Renovaveis Magazine*.
- McCall, J. (2005). Genetic algorithms for modelling and optimisation. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 205-222.
- Nassi, C. D., & Lopes, L. (6 de Julho de 2010). O problema de localização de terminais concentradores e sua aplicação nas redes de transporte intermodal do... Obtido de ResearchGate: <https://www.researchgate.net/publication/279662308>

- Ozmen, A., & Sahingoz, O. K. (2005). Solving Hub Location Problem with Genetic Algorithm. *Semantic Scholar*, 967-984.
- Sangsuwan, T., Thepphaeng, S., & Pirak, C. (2014). Experimental Performance Analysis of Powerline Communication Technologies in AMI Systems. *The 20th Asia-Pacific Conference on Communication (APCC2014)*, 382-386.
- Shetty, B., Sharathy, R., & Sen, A. (2 de Fevereiro de 1992). Applied Mathematical Modeling. *Elsevier*, 94-100.
- Souza, G. B., Vieira, F. H., Lima, C. R., Júnior, G. A., Castro, M. S., Araujo, S. G., & Vasques, T. L. (2016). Developing Smart Grids Based on GPRS and ZigBee Technologies Using Queueing Modeling-Based Optimization Algorithm. *Etri Journal*, 41-51.
- Tavasoli, M., Yaghmaee, M. H., & Mohajerzadeh, A. H. (2016). Optimal Placement of Data Aggregators in Smart Grid on Hybrid Wireless and Wired Communication. *2016 IEEE Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, 332-336.
- Uluski, R. (2010). The Role of Advanced Distribution Automation. *IEEE PES General Meeting*, 1-5.
- Wei, X., Yu-hui, Z., & Jie-lin, Z. (2009). Energy-efficient Distribution in Smart Grid. *2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, 1-6.
- Yang, X.-S. (2011). Metaheuristic Optimization. *Mathematics and Scientific Computing, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, UK*, 21-32.

## Anexo

Neste anexo são apresentadas as distribuições de *smart meters* e agregadores no espaço onde devem ser instalados, nos testes efetuados para os modelos A e G com diferentes dimensões.

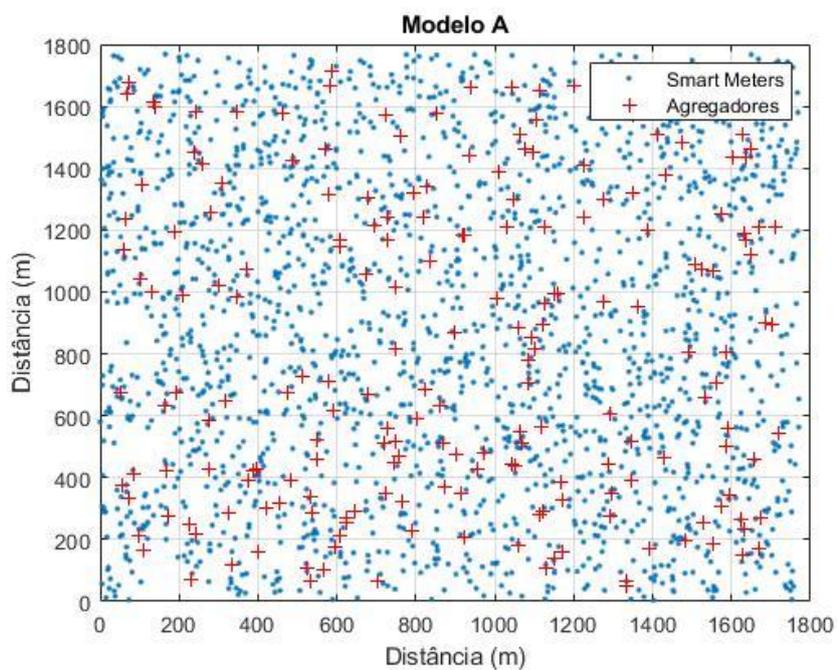


Figura 18 - Distribuição dos smart meters e dos locais potenciais para a localização de agregadores, correspondente ao teste 1 de A/2000-200.

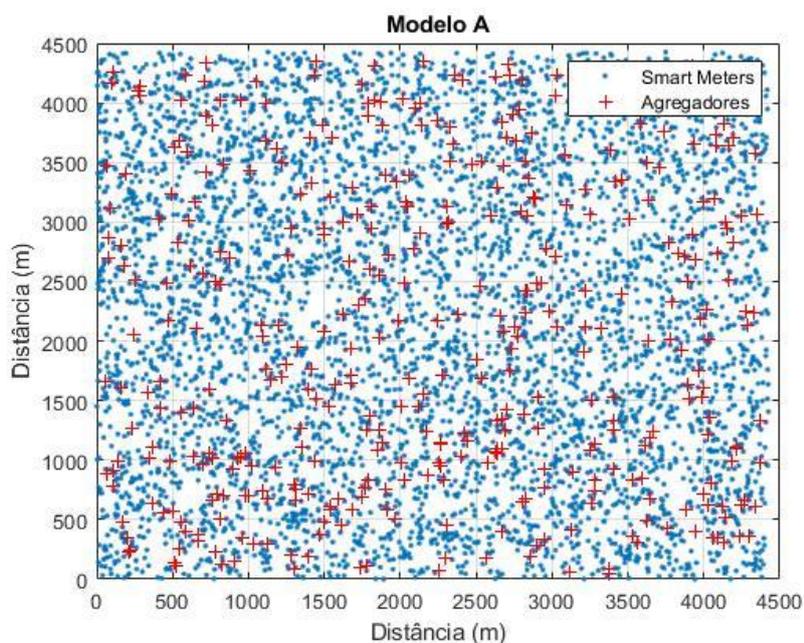


Figura 19-Distribuição dos smart meters e dos locais potenciais para a localização de agregadores, correspondente ao teste 1 de A/5000-400.

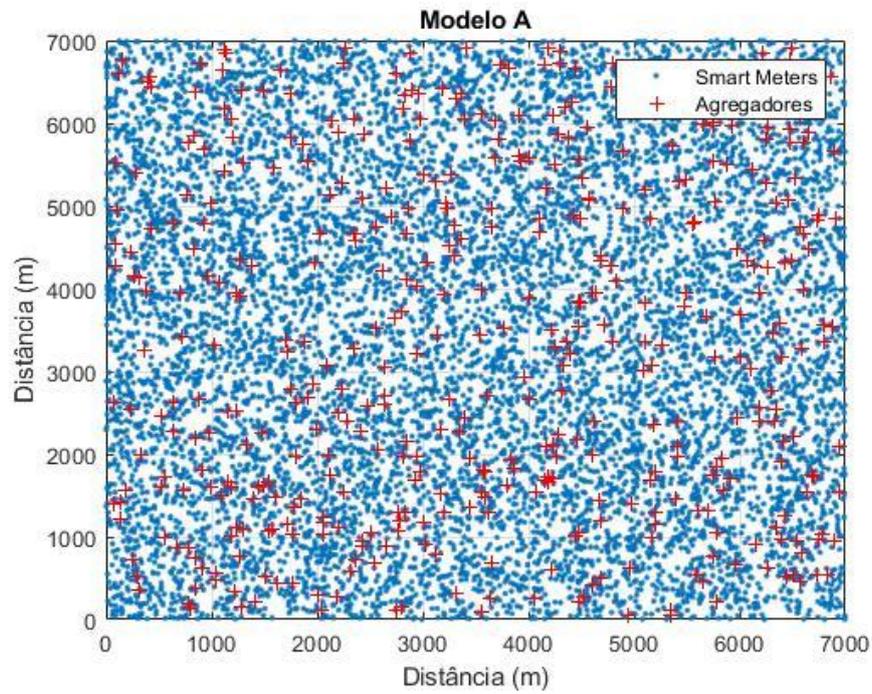


Figura 20 - Distribuição dos smart meters e dos locais potenciais para a localização de agregadores, correspondente ao teste 1 da A/10000-450.

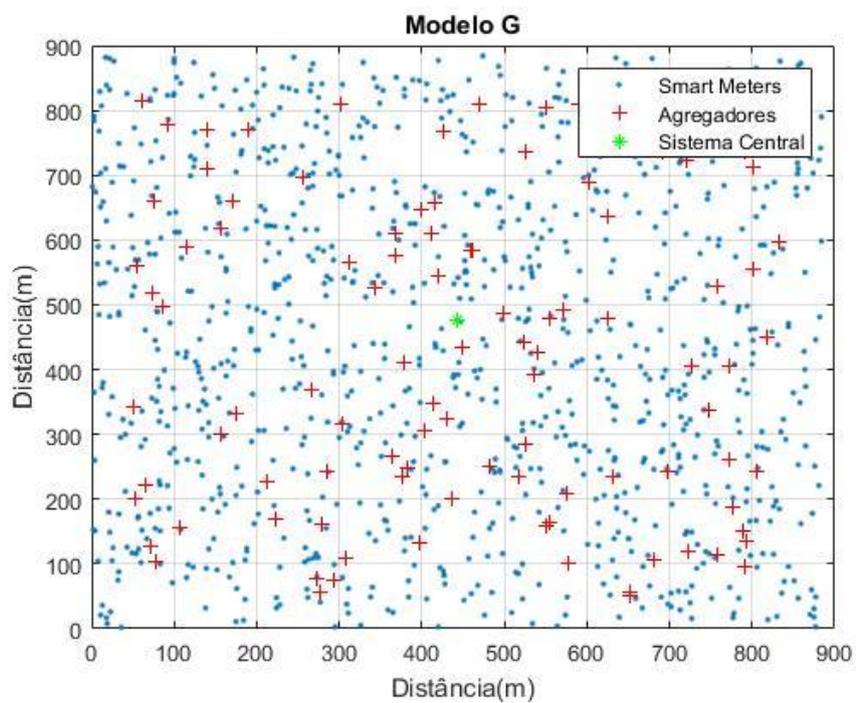


Figura 21 - Distribuição dos agregadores e dos locais potenciais para a instalação de agregadores, correspondente ao teste 1 de G/1000-100.

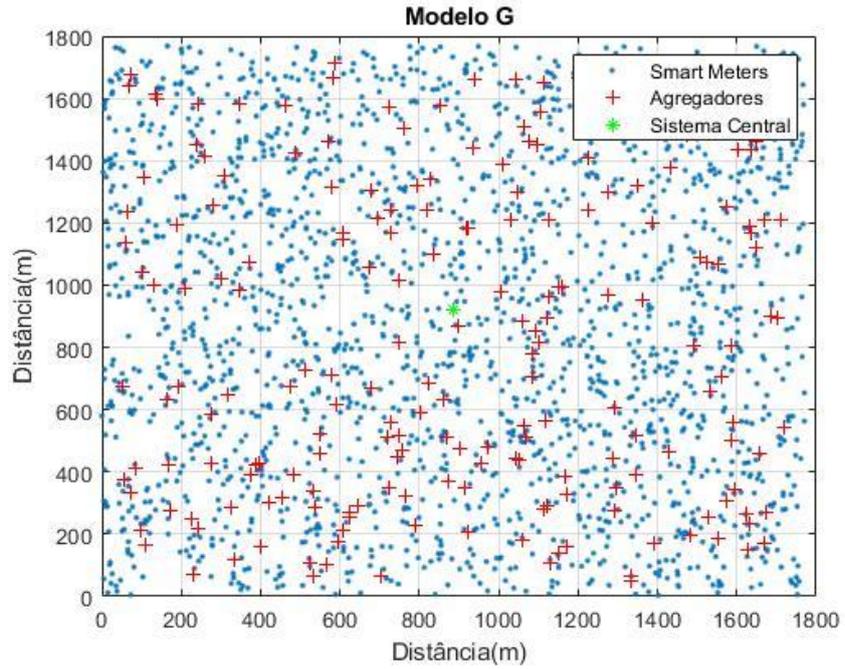


Figura 22 - Distribuição dos agregadores e dos locais potenciais para a instalação de agregadores, correspondente ao teste 1 de G/2000-200.

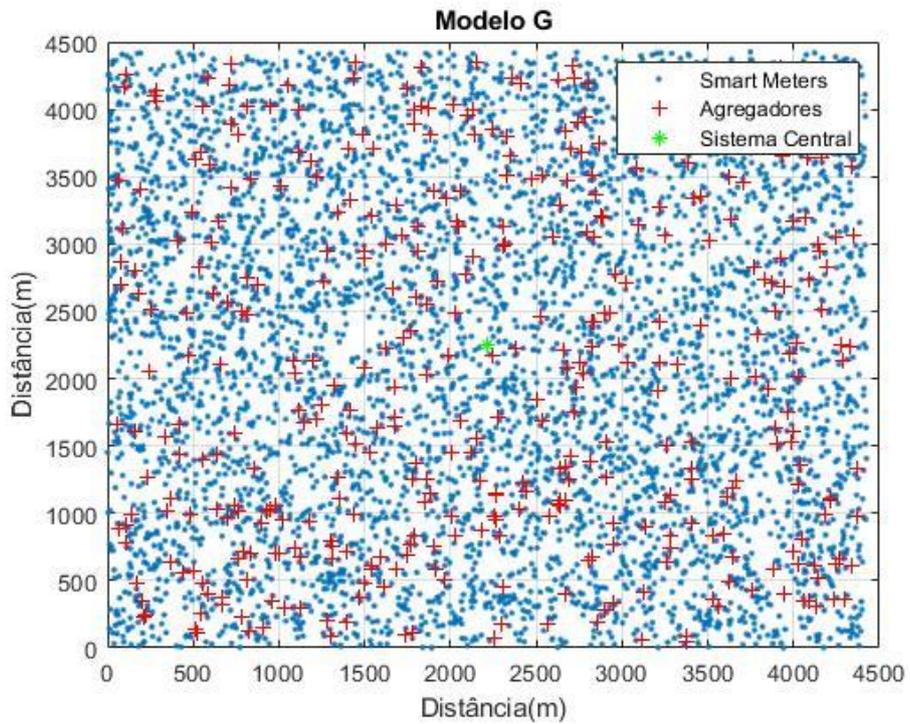


Figura 23 - Distribuição dos agregadores e dos locais potenciais para a instalação de agregadores, correspondente ao teste 1 de G/5000-400.

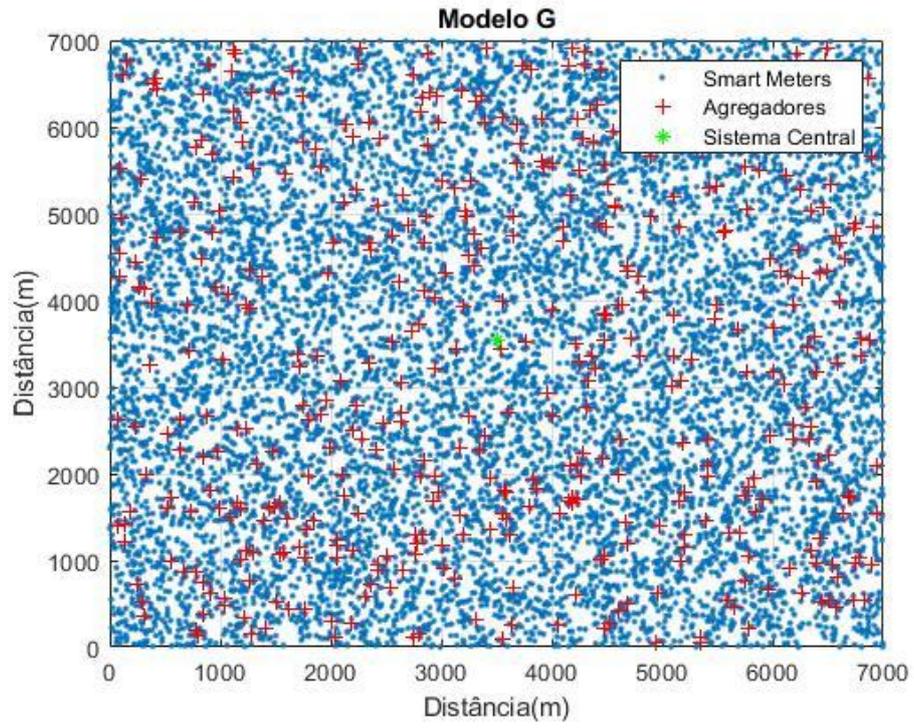


Figura 24 - Distribuição dos agregadores e dos locais potenciais para a instalação de agregadores, correspondente ao teste 1 de G/10000-450.