

# OPERAÇÃO DO SISTEMA IBÉRICO DE GÁS NATURAL LOCALIZAÇÃO DAS FONTES DE ABASTECIMENTO

Nogueira, T. A. [1], Vale, Z. A. [2]

[1] e [2] Instituto Politécnico do Porto, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Departamento de Engenharia Electrotécnica, Grupo de Investigação em Engenharia do Conhecimento e Apoio à Decisão - GECAD – [tan@isep.ipp.pt](mailto:tan@isep.ipp.pt); [zav@isep.ipp.pt](mailto:zav@isep.ipp.pt)

## Resumo

**Em consequência do acentuado crescimento da procura do gás natural, é essencial a organização de uma eficiente infra-estrutura de abastecimento de gás. O local certo para instalar as UFGs - Unidades de Fornecimento de Gás, assim como a afectação óptima dessas fontes às cargas de gás da rede, devem ser convenientemente planeados, de forma a minimizar os custos totais do sistema. Este estudo foi efectuado com o desenvolvimento de uma metodologia de cálculo baseada na aplicação do problema das *P*-medianas, resolvido pela abordagem *Lagrangeana*.**

**A heurística *Lagrangeana* desenvolvida foi aplicada ao caso concreto da rede Ibérica primária de gás natural, modelizada em 65 nós de carga, ligados quer por gasodutos físicos quer por gasodutos virtuais. São apresentados os resultados computacionais gráficos que apoiam a decisão da escolha das UFGs, para um cenário previsível de evolução da procura do combustível até 2015.**

*Palavras-chave:* Unidades de Fornecimento de Gás (UFGs), Heurística *Lagrangeana*, Gasodutos virtuais, Problema *P*-medianas.

## 1. INTRODUÇÃO

O gás natural incorpora interesses nacionais da máxima importância ao nível económico, político e social. Para os países produtores, este constitui, simultaneamente, uma fonte de riqueza e um factor de aceleração do crescimento. Para os países consumidores, o acesso às fontes de abastecimento tem sido um aspecto dominante no processo de desenvolvimento dos seus mercados (Arentsen, 2003).

Ao contrário da electricidade, o gás natural é um produto energético que pode ser armazenado. São instalações de armazenamento os terminais marítimos, os depósitos (aéreos ou subterrâneos) de gás, os pontos de injeção na rede e, no caso de países produtores, os locais de extracção de gás natural. Estas instalações constituem as fontes de abastecimento do sistema gasista, são as Unidades de Fornecimento de Gás – UFGs, que garantem a satisfação das necessidades de gás (Nogueira e Vale, 2007). A gestão das operações destas instalações permite o despacho da rede de gás natural, garantindo o equilíbrio da oferta e procura.

A verificação do crescimento acentuado da procura exige, num futuro próximo, o investimento de novas UFGs (Nogueira *et al.*, 2007). O estudo apresentado neste trabalho tem como objectivo apoiar a decisão sobre a localização óptimas destas infra-estruturas na rede de gás natural, assim como a sua afectação às cargas, garantindo a operação eficiente do sistema,

a total satisfação da procura e a minimização dos custos totais do sistema.

Na generalidade, as cargas de gás estão ligadas às UFGs através dos gasodutos físicos, nos quais o gás é transportado na sua forma gasosa. Em alternativa, o gás pode ser transportado por gasoduto virtual, que consiste no transporte rodoviário de gás na sua forma liquefeita, para satisfazer a procura em regiões que ainda não contam com o abastecimento por gasoduto.

O problema da localização de instalações constitui uma subárea dentro do vasto campo da optimização (Daskin, 1995). No caso do sistema de gás natural, as localizações inadequadas de UFGs, resultantes de decisões empíricas e mal fundamentadas, conduzirão a um aumento de custos, a uma baixa rentabilidade do investimento e da exploração e a uma diminuição da competitividade da indústria.

A metodologia desenvolvida neste trabalho para localização das UFGs na rede de gás natural é decomposta em duas etapas distintas: a primeira estuda a localização das UFGs na rede e a segunda, partindo dos resultados da localização, efectua a afectação óptima às fontes das fontes às cargas. A segunda etapa foi formulada como um problema de transporte, com possibilidade de resolução pela abordagem exacta (Nogueira e Vale, 2008).

## 2. MODELIZAÇÃO DA REDE IBÉRICA

A metodologia de localização das UFGs desenvolvida neste trabalho, será aplicada à rede Ibérica primária de gasodutos de alta pressão, reproduzindo o funcionamento real do sistema Ibérico e as suas restrições técnicas. As cargas de gás natural foram organizadas em 65 unidades geográficas, correspondentes aos 18 distritos portugueses (excluídas as regiões autónomas) e às 47 províncias espanholas, consoante apresentado na Fig. 1.

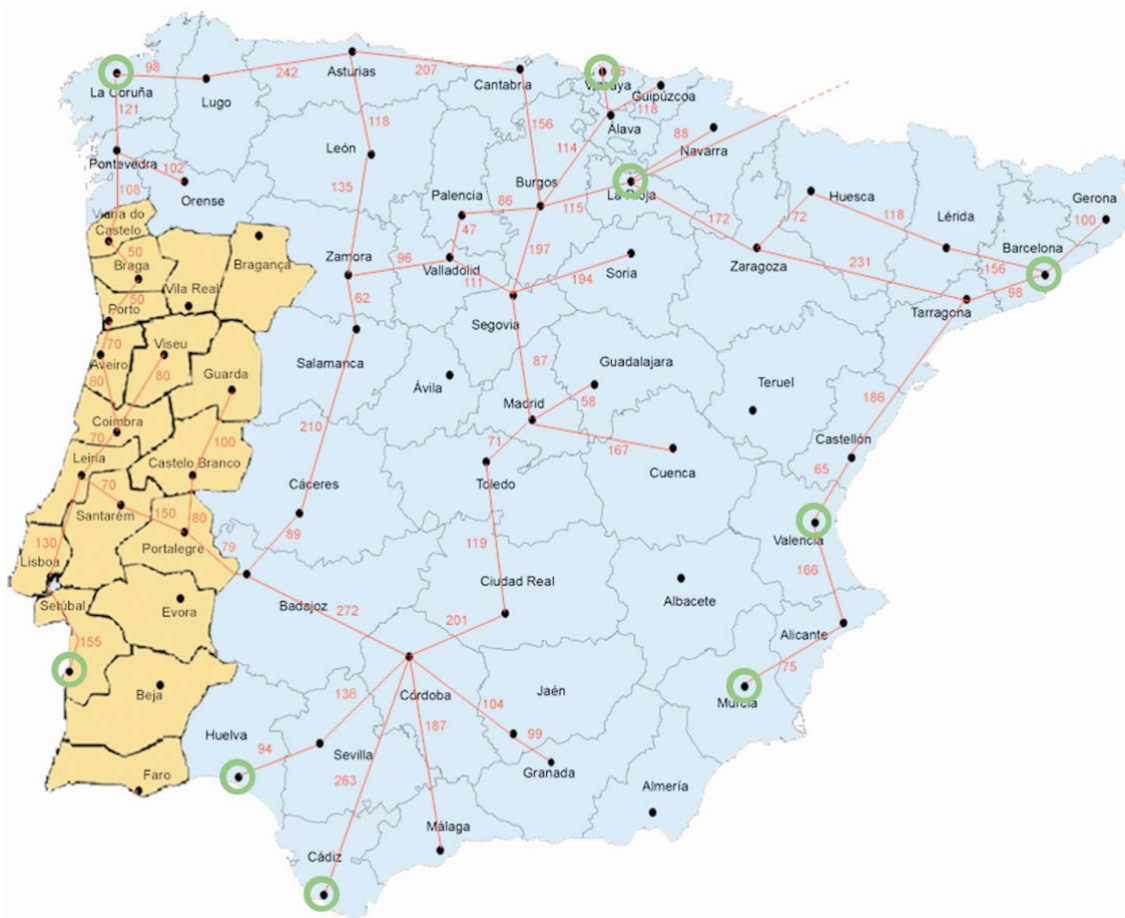


Figura 1 – Rede de Transporte Ibérica de Gás Natural

Cada uma das 65 áreas geográficas constitui um nó de carga, tendo sido calculado um consumo acumulado para cada um, para uma evolução de procura prevista para 2015 (Nogueira *et al.*, 2006). Esta previsão está assinalada na sexta coluna da Tab.1.

Os nós são ligados uns aos outros por gasodutos físicos, assinalados na Fig. 1 pelas linhas vermelhas. Para as regiões ainda não abrangidas pelos gasodutos: Vila Real, Bragança, Évora, Beja, Faro, Ávila, Almeria, Teruel e Albacete, considera-se efectuada a ligação por gasodutos virtuais (não assinalados na Fig.1 para não congestionar).

Tratando-se de uma rede real, existem já UFGs instaladas no sistema, estando assinaladas na Fig. 1 por nove círculos. Estas UFGs estão a satisfazer a procura actual de gás natural e, por razões económicas, o seu local não deve ser alterado. Para acompanhar a evolução de procura prevista para o horizonte de 2015, vai ser necessário a instalação de novas UFGs.

Na quarta e quinta coluna da Tab.1 são apresentadas as coordenadas das 65 cargas de gás, correspondendo os consumos a valores anuais. Estes dados são particularmente importantes para o cálculo da matriz distâncias  $[d_{ij}]$ , parâmetro do modelo de localização desenvolvido.

Tabela I – Caracterização dos nós da rede Ibérica

| Nó nº | Nome          | Abrev. | Longitude | Latitude | Consumo (Mm <sup>3</sup> ) |
|-------|---------------|--------|-----------|----------|----------------------------|
| 1     | Aveiro        | AVE    | -8,38     | 40,38    | 1 070,61                   |
| 2     | Beja          | BEJ    | -7,52     | 38,01    | 241,87                     |
| 3     | Braga         | BRA    | -8,26     | 41,33    | 1 247,34                   |
| 4     | Bragança      | BRG    | -6,45     | 41,49    | 223,26                     |
| 5     | Castelo Bran- | CTB    | -7,29     | 39,49    | 312,18                     |
| 6     | Coimbra       | CMB    | -8,25     | 40,12    | 662,02                     |
| 7     | Évora         | EVR    | -7,90     | 38,50    | 260,17                     |
| 8     | Faro          | FAR    | -7,56     | 37,01    | 592,95                     |
| 9     | Guarda        | GRD    | -7,16     | 40,14    | 260,63                     |
| 10    | Leiria        | LEI    | -8,48     | 39,75    | 689,33                     |
| 11    | Lisboa        | LSB    | -9,15     | 38,73    | 3 204,73                   |
| 12    | Portalegre    | PRL    | -7,43     | 39,03    | 190,57                     |
| 13    | Porto         | PRT    | -8,37     | 41,09    | 7 642,81                   |
| 14    | Santarém      | STR    | -8,41     | 39,14    | 5 682,64                   |
| 15    | Setúbal       | STB    | -8,54     | 38,32    | 1 182,96                   |
| 16    | Viana         | VCT    | -8,50     | 41,42    | 375,50                     |
| 17    | Vila Real     | VLR    | -7,45     | 41,18    | 335,67                     |
| 18    | Viseu         | VIS    | -7,87     | 40,78    | 592,53                     |
| 19    | Corunha       | COR    | -8,40     | 43,40    | 3 441,76                   |
| 20    | Lugo          | LUG    | -7,30     | 43,00    | 1 268,55                   |
| 21    | Pontevedra    | PTV    | -8,63     | 42,43    | 2 909,41                   |
| 22    | Orense        | ORS    | -7,86     | 42,40    | 1 217,49                   |
| 23    | Astúrias      | AST    | -6,00     | 43,20    | 4 074,29                   |
| 24    | Cantábria     | CAN    | -4,00     | 43,20    | 2 620,96                   |
| 25    | Bilbao        | BLB    | -2,55     | 43,15    | 5 446,59                   |
| 26    | San Sebastian | SSB    | -2,10     | 43,10    | 4 182,16                   |

| Nó nº | Nome        | Abrev. | Longitude | Latitude | Consumo (Mm <sup>3</sup> ) |
|-------|-------------|--------|-----------|----------|----------------------------|
| 27    | Vitória     | VTR    | -2,45     | 42,50    | 3 083,66                   |
| 28    | Leão        | LEO    | -5,50     | 42,60    | 1 723,79                   |
| 29    | Palencia    | PLC    | -4,32     | 42,01    | 812,69                     |
| 30    | Burgos      | BUR    | -3,07     | 42,35    | 1 342,65                   |
| 31    | Zamora      | ZMR    | -6,00     | 41,45    | 882,13                     |
| 32    | Valladolid  | VLD    | -4,73     | 41,65    | 1 776,83                   |
| 33    | Soria       | SOR    | -2,28     | 41,46    | 584,66                     |
| 34    | Segóvia     | SGV    | -4,00     | 41,10    | 761,96                     |
| 35    | Ávila       | AVI    | -4,42     | 40,39    | 471,98                     |
| 36    | Salamanca   | SLM    | -5,65     | 40,95    | 1 318,33                   |
| 37    | Córdoba     | CRD    | -4,77     | 37,88    | 3 395,89                   |
| 38    | Huelva      | HLV    | -7,00     | 37,25    | 2 546,52                   |
| 39    | Sevilha     | SEV    | -6,00     | 37,40    | 6 305,05                   |
| 40    | Jaén        | JAE    | -3,78     | 37,77    | 3 045,24                   |
| 41    | Cádiz       | CDZ    | -6,28     | 36,50    | 4 516,12                   |
| 42    | Málaga      | MLG    | -4,42     | 36,72    | 5 286,38                   |
| 43    | Granada     | GRN    | -3,60     | 37,18    | 3 612,12                   |
| 44    | Almeria     | ALM    | -2,47     | 36,83    | 1 730,21                   |
| 45    | Huesca      | HSC    | -1,00     | 42,10    | 1 383,99                   |
| 46    | Zaragoza    | ZRG    | -0,88     | 41,63    | 3 351,28                   |
| 47    | Teruel      | TER    | -1,06     | 40,21    | 398,68                     |
| 48    | Lérida      | LRD    | 0,62      | 41,62    | 3 837,78                   |
| 49    | Tarragona   | TRG    | 1,25      | 41,12    | 4 700,95                   |
| 50    | Barcelona   | BAR    | 2,17      | 41,38    | 17 477,27                  |
| 51    | Gerona      | GRN    | 2,40      | 42,10    | 4 586,78                   |
| 52    | Guadalajara | GUA    | -2,30     | 40,50    | 1 349,73                   |
| 53    | Cuenca      | CUE    | -2,08     | 40,04    | 1 361,70                   |
| 54    | Albacete    | ALB    | -2,00     | 39,00    | 1 086,87                   |
| 55    | Cidade Real | CDR    | -4,00     | 39,00    | 2 187,05                   |
| 56    | Toledo      | TLD    | -4,01     | 39,52    | 2 464,52                   |
| 57    | Cáceres     | CAC    | -6,22     | 39,29    | 1 165,83                   |
| 58    | Badajoz     | BDJ    | -6,59     | 39,00    | 1 896,90                   |
| 59    | La Rioja    | RIO    | -2,24     | 42,17    | 1 882,81                   |
| 60    | Madrid      | MAD    | -3,41     | 40,24    | 21 497,11                  |
| 61    | Múrcia      | MUR    | -1,10     | 38,00    | 6 870,66                   |
| 62    | Navarra     | NAV    | -1,40     | 42,45    | 2 709,01                   |
| 63    | Castellon   | CTL    | -0,03     | 41,00    | 3 427,64                   |
| 64    | Valencia    | VAL    | -0,23     | 39,20    | 8 720,76                   |
| 65    | Alicante    | ALC    | -0,50     | 38,35    | 6 787,29                   |

### 3. METODOLOGIA DESENVOLVIDA

Dadas as características do sistema de gás natural e as suas restrições técnicas, o estudo da localização das UFGs na rede é formulado como um problema das  $P$ -medianas (apresentado na secção 3.1), com o objectivo de localizar um número  $P$  de fontes de abastecimento de gás de modo que cada nó de carga seja ligado à sua fonte abastecedora mais próxima (Dresner, 1995). Este constitui um problema de programação inteiro, sendo resolvido com a aplicação da relaxação *Lagrangeana* (secção 3.2). A solução de localização de UFGs gerada pela heurística *Lagrangeana*, sucede-se a afectação das cargas às  $P$  UFGs já localizadas, utilizando o clássico problema de transporte, com possibilidade de resolução pela abordagem exacta (secção 3.3).

#### 3.1 Aplicação ao problema das $P$ -medianas

O problema das  $P$ -medianas parte da seguinte formulação:

$$Z = \text{Min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \alpha \cdot d_{ij} \cdot b_j \cdot X_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m X_{ii} = P \quad (3)$$

$$X_{ij} \leq X_{ii} \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (5)$$

Sendo:  $n$  o número de nós de carga da rede;  $m$  o número de nós potenciais para instalação de UFG;  $\alpha \cdot d_{ij}$  a matriz simétrica de custos (distâncias) entre os nós  $i$  e  $j$ , com  $d_{ii} = 0$  para qualquer  $i$ ;  $\alpha$  é o custo quilométrico da unidade de gás natural transportada;  $X_{ij}$  a matriz de afectação dos nós de carga aos nós fornecedores, sendo  $X_{ij} = 1$  se o nó  $j$  for alimentado pelo nó  $i$  e  $X_{ij} = 0$ , caso contrário;  $X_{ii} = 1$  se o nó  $i$  contiver uma mediana e  $X_{ii} = 0$ , caso contrário;  $b_j$  procura do nó  $j$ ;  $P$  o número de UFGs (medianas) a localizar na rede.

A “equação (1)” é a função objectivo que minimiza a distância ponderada pelo seu custo entre os nós  $i$  e  $j$ . A “restrição (2)” garante que cada nó é abastecido por uma UFG. A “restrição (3)” fixa o número  $P$  de UFGs a localizar na rede. As “restrições (4)” garantem que um nó  $j$  só poderá estar afecto a um nó  $i$ , se este nó  $i$  for uma fonte abastecedora e as “restrições (5)” exprimem o carácter binário das variáveis.

Para simplificar um pouco a formulação matemática, os parâmetros  $\alpha$  e  $b_j$  podem ser incluídos nos valores  $[d_{ij}]$  da matriz distâncias. Se se optar por considerar que todos os nós de carga são nós potenciais para instalação de UFGs, então  $m = n$ , conferindo aos coeficientes da formulação matemática em ordem a  $i$  e  $j$  a mesma dimensão.

#### 3.2 Relaxação do problema

Com as assumções anteriores, a formulação matemática do problema das  $P$ -medianas pode ser descrito pelas expressões seguintes:

$$Z = \text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} \cdot X_{ij} \quad (6)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1, \quad \forall j \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} = P \quad (8)$$

$$X_{ij} \leq X_{ii} \quad \forall i, j; i \neq j \quad (9)$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, \quad (10)$$

Para o problema apresentado, a “restrição (7)” é a complicadora. Segundo as considerações da metodologia *Lagrangeana* estas restrições são eliminadas e adicionadas à função-objectivo, pesadas pelos seus multiplicadores de *Lagrange*. O problema relaxado obtido é o seguinte:

$$Z_{Rel} = Min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} \cdot X_{ij} - \sum_{i=1}^n \lambda_i (\sum_{j=1}^n X_{ij} - 1) \quad (11)$$

sujeito de (8) a (10)

ou, escrito de outra forma:

$$Z_{Rel} = Min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (d_{ij} - \lambda_i) \cdot X_{ij} + \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (12)$$

sujeito de (8) a (10)

Para o cálculo dos multiplicadores de Lagrange será usado o método de optimização do subgradiente (Senne e Loraine, 1999), obtendo-se em cada passo, uma solução que tende a ser melhorada à medida à medida que o algoritmo evolui.

O problema é resolvido considerando, implicitamente, a “restrição (8)”, ou seja, é necessário efectuar o cálculo para vários valores de  $P$  para se poder decidir sobre o valor adequado de UFGs de modo a minimizar os custos totais do sistema.

### 3.3 Afectação das cargas às UFGs

Com a utilização do resultado da heurística *Lagrangeana*, o problema da afectação reduz-se a um problema de transporte. Na realidade, estando as posições das UFGs definidas, a formulação exacta do problema de afectação recai num problema de programação linear, para o qual a abordagem exacta apresenta as soluções óptimas. A formulação deste problema fica com uma dimensão  $P \times n$ , sendo  $P$  o número de UFGs localizadas e  $n$  o número de nós do sistema. O valor de  $P$ , que constitui o resultado da heurística *Lagrangeana*, será agora um dado de entrada do problema de transporte.

### 3.4 Resultados obtidos

A aplicação da metodologia *Lagrangeana* à rede Ibérica conduziu o programa à apresentação dos resultados apresentados graficamente na Fig. 2, onde se pode constatar que a solução foi optimizada com a localização de 14 UFGs. Destas catorze localizações, nove fontes já existiam na rede (ver secção 2) que correspondem às UFGs localizadas em: Setúbal, Corunha, Bilbao, Huelva, Cadiz, Barcelona, La Rioja, Valência e Múrcia, uma vez que estas fontes já existem e não se pretende alterar a sua localização.

Para cada UFG localizada foi efectuada a afectação óptima às cargas, assim como o modo de transporte de gás, constituindo um conjunto de 14 *clusters*. A título de exemplo são destacados 3 *clusters*, identificados na Fig. 2 pelas áreas sombreadas a azul. Para o caso da UFG localizada em Málaga (MLG), dado o valor do consumo solicitado, o programa optimizou a solução estipulando que esta fonte apenas deverá alimentar a sua própria carga.

Caso as cargas estejam incluídas no sistema de gasodutos, o transporte do gás é efectuado por gasodutos físicos, assinalados na Fig. 2 pelo traço contínuo. As cargas situadas fora da abrangência dos gasodutos físicos são abastecidas por gasodutos virtuais, identificados pelo

traço intermitente. Os nós da rede estão assinalados pelas abreviaturas das regiões, de acordo com a definição proposta na terceira coluna da Tab.1.

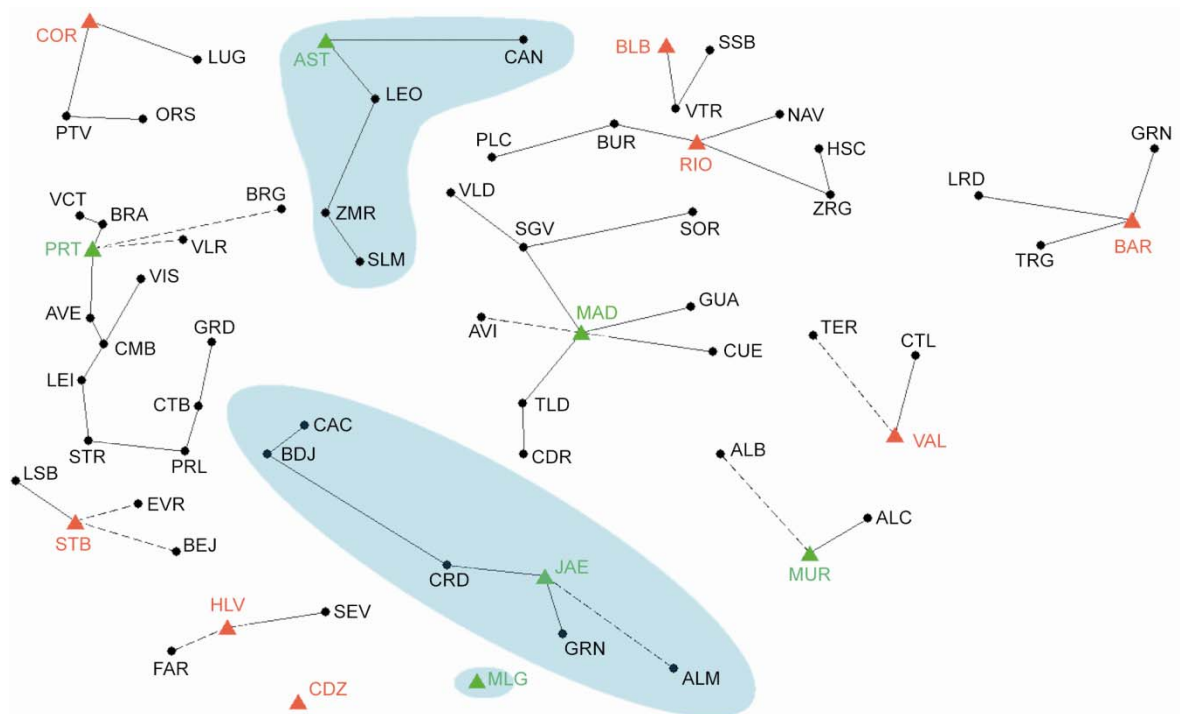


Figura 2 – Resultado mapeado para a rede Ibérica

#### 4. CONCLUSÕES

Os recentes desenvolvimentos do sector do gás natural revelam a tendência para uma procura crescente deste produto, nomeadamente a nível europeu e, particularmente, ao nível Ibérico. Para dar resposta às crescentes solicitações da carga haverá necessidade de instalar novas UFGs, infra-estruturas que comportam um investimento considerável, bem como prever vias alternativas de transporte deste combustível que garanta o abastecimento dos diversos pontos de consumo. Neste contexto, sendo a localização um dos factores mais importantes para assegurar a viabilidade económica de uma UFG, os estudos de localização destas instalações podem desempenhar uma contribuição significativa para apoiar e fundamentar decisões de investimento e o desenvolvimento sustentado da indústria do gás natural.

Foi com esta motivação que se desenvolveu o presente trabalho. Com ele pretendeu-se elaborar um modelo de simulação de localização de infra-estruturas de abastecimento de gás numa rede de transporte, que tivesse em consideração a parametrização dos elementos essenciais caracterizadores de uma rede de gás natural.

A aplicação dos modelos exactos é inviável em sistemas de média e grande dimensão, por isso, surgiu esta proposta do desenvolvimento da heurística *Lagrangeana* para resolver o problema das *P*-medianas, combinada com o método exacto de transporte para afectação das UFGs às cargas de gás.

A metodologia proposta foi programada e tem possibilidade de aplicação a diversos tipos de redes, tendo sido escolhida a rede Ibérica primária de gasodutos a alta pressão para apresentação de resultados. Esta metodologia desenvolvida demonstrou ser eficaz e flexível para redes de diversas dimensões, permitindo a obtenção da solução óptima mesmo quando sujeita a variações dos seus parâmetros.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ARENTSEN, F. e KUNNEKE, R. **National Reforms in European Gas**. Oxford: Elsevier Global Energy Policy and Economics Series, 2003

DASKIN, M. **Network and Discrete Location Models, Algorithms and Applications**. USA: John Wiley & Sons, 1995

DRESNER, Z. **Facility Location: A Survey of Application and Methods**. New York: Springer Series in Operation Research, 1995

NOGUEIRA, T., MENDES, R., VALE, Z. e CARDOSO, J. **Heuristic Model for Iberian Natural Gas Sources Location**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM, Journal WSEAS Transactions, 1, Setembro 2006, Lisboa, pp. 1343-1349

NOGUEIRA, T. e VALE, Z. **Natural Gas Location Design and Operation**. In: XCLEEE – 10º CONGRESSO LUSO-ESPANHOL DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA, 1, Julho 2007, Madeira. pp. 2.25-2.28

NOGUEIRA, T., MENDES, R., VALE, Z. e CARDOSO, J. **An Heuristic Approach for Optimal Location of Gas Supply Units in Transportation System**. In: 22<sup>nd</sup> INTERNATIONAL SCIENTIFIC MEETING OF GAS EXPERTS, 1, Maio 2007, Croacia. pp. 303-311

NOGUEIRA, T. e VALE, Z. **Natural Gas System Operation: Lagrangean Optimization Techniques**. In: IGRC – INTERNATIONAL GAS UNION RESEARCH CONFERENCE, Outubro 2008, Paris

SENNE, E. e LORENA, L. **Improving traditional subgradient scheme for Lagrangean relaxation: an application to location problems**. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF MATHEMATICAL ALGORITHMS, 1, 1999, pp.133-151