

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

**PROJECTOS DE INVESTIGAÇÃO CIENTÍFICA E
DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO**

PROJECTO N° POCI/ENR/57082/2004

**“Modelos Multiobjectivo Input-Output para Estudo
das Interacções Energia-Ambiente-Economia”**

1.9.2005 – 31.8.2008

RELATÓRIO FINAL

Referência do projecto: POCI/ENR/57082/2004_

Título do projecto: Modelos Multiobjectivo Input-Output para Estudo das Interacções Energia-Ambiente-Economia

Data de Início do Projecto: 1/Setembro/2005

Duração: 36 Meses

Identificação da instituição proponente

Nome ou designação social Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra (INESC Coimbra)

Morada Rua Antero de Quental, 199

Localidade Coimbra Código postal 3000-033

Telefone 239851040 Fax 239824692 Email secretaria@inescc.pt

Unidade responsável pela execução do projecto

Nome Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra (INESC Coimbra)

Morada Rua Antero de Quental, 199

Localidade Coimbra Código postal 3000-033

Telefone 239851040 Fax 239824692 Email secretaria@inescc.pt

Identificação do investigador responsável

Nome Carlos Alberto Henggeler de Carvalho Antunes

Telefone 239851040 Fax 239824692 Email cantunes@inescc.pt

Equipa de Investigação

Carlos Alberto Henggeler de Carvalho Antunes (Investigador Responsável)

Ana Rosa Pereira Borges

Humberto Manuel Matos Jorge

António Manuel de Oliveira Gomes Martins

Dulce Helena Carvalho Coelho

Carla Margarida Saraiva Oliveira

Resumo dos trabalhos desenvolvidos

Este relatório final documenta os trabalhos desenvolvidos no âmbito do Projecto “Modelos Multiobjectivo Input-Output para Estudo das Interações Energia-Ambiente-Economia” (POCI/ENR/57082/2004) entre 1.9.2005 – 31.8.2008. Neste projecto podem distinguir-se duas vertentes fundamentais do trabalho de I&D realizado: uma de natureza mais aplicada relacionada com o contexto do estudo das interações entre os sistemas energético, económico e ambiental que conduziu à construção de modelos de programação linear com múltiplas funções objectivo baseados em análise input-output, e uma outra, de natureza mais teórica e metodológica, relativa ao desenvolvimento de algoritmos de programação matemática tendo em conta a incerteza associada aos dados de entrada dos modelos no sentido da obtenção de conclusões robustas. Algumas das vias de investigação suscitadas por esta vertente da actividade do projecto foram exploradas noutros problemas do sector energético relacionados com o tópico principal do projecto.

Na vertente de construção de modelos matemáticos foram desenvolvidos novos modelos e aperfeiçoados modelos anteriormente propostos de programação linear multiobjectivo, para o estudo das interações entre o sistema energético, os impactes ambientais e a economia a nível nacional. O desenvolvimento destes modelos insere-se numa linha de pesquisa da equipa de investigação do projecto, procurando ajustá-los de forma cada vez mais precisa à realidade nacional (mas replicáveis noutros contextos de análise) através quer da recolha de dados mais actualizados e fiáveis, quer sobretudo da introdução de novos elementos, à custa da formulação de versões mais sofisticadas das variáveis de decisão, das restrições e das funções objectivo que melhorem a adequação do modelo à realidade e, conseqüentemente, a possibilidade de dele extrair conclusões com significado face à situação em análise. Estes modelos de programação linear multiobjectivo são baseados na estrutura linear das relações de produção inter/intra-industriais (análise input-output). O principal valor acrescentado dos modelos desenvolvidos neste projecto é permitirem aos decisores considerar múltiplos, conflituosos e incomensuráveis aspectos de avaliação do mérito das soluções potenciais, revelando os compromissos (*trade-offs*) associados a estratégias energéticas sustentáveis, ao crescimento económico, ao bem-estar social e às preocupações ambientais.

Na vertente de tratamento da incerteza, associada aos coeficientes dos modelos de programação multiobjectivo, foram desenvolvidas técnicas algorítmicas, de natureza interactiva para tirar partido da informação sobre as preferências do decisor para limitar o esforço computacional, para o cálculo de soluções robustas. Dada a dimensão e complexidade destes modelos, bem como a imprecisão intrínseca associada aos dados, a caracterização de soluções robustas (i.e., o mais possível “ímmunes” às diversas fontes de incerteza), foram desenvolvidos algoritmos originais dedicados ao cálculo de soluções robustas quando os coeficientes do modelo de programação linear multiobjectivo são expressos através de números intervalares. Esta forma de modelação da incerteza é particularmente interessante porque não pressupõe o conhecimento de distribuições de probabilidade, como em programação estocástica, ou de funções membro, como em programação difusa. Os algoritmos de programação intervalar foram desenvolvidos tendo em conta a respectiva aplicabilidade em modelos de alguma dimensão, cujos coeficientes derivam de matrizes input-output.

As vias de investigação teórica e metodológica abertas por este projectos que foram exploradas noutros problemas do sector energético consistiram no desenvolvimento de modelos de programação inteira multiobjectivo para apoio à tomada de decisões em problemas de controlo directo de cargas no quadro de acções de gestão da procura de energia eléctrica, de técnicas integrando Data Envelopment Analysis e análise multicritério para avaliação de eficiência das unidades de biogás, de estudos dos mercados de electricidade, e de modelos de apoio à decisão para planeamento energético integrado local.

Publicações

Livros

Pereira da Silva, Patrícia. "O Sector da Energia Eléctrica na União Europeia", Imprensa da Universidade de Coimbra, 2007 (ISBN: 978-989-8074-15-7).

Special issues de revistas científicas

Special Section Operational research models and methods in the energy sector. C. Henggeler Antunes, A. Gomes (Guest-Editors), Energy Policy, vol. 36, issue 7, 2293-2459, July 2008. [Inclui o texto: Henggeler Antunes, C., A. Gomes. Operational research models and methods in the energy sector—Introduction to the special issue, Energy Policy, vol. 36, issue 7, 2293-2295, July 2008]

Feature cluster Operational research models and methods in the energy sector. C. Henggeler Antunes, A. Gomes (Eds.). European Journal of Operational Research [disponível no site da Elsevier, aguarda publicação].

Special issue Operational research models and methods in the energy sector. C. Henggeler Antunes, A. Gomes (Eds.). International Journal of Energy Sector Management, vol. 2, no. 3, 2008. [Inclui o texto: Henggeler Antunes, C., A. Gomes. Guest Editorial, International Journal of Energy Sector Management, vol. 2, no. 3, 314-317, 2008]

Capítulos de Livros

Barrico, C., C. Henggeler Antunes. "An Evolutionary Approach for Assessing the Degree of Robustness of Solutions to Multi-Objective Models". In: Y. S. Ong, J. Yaochu, Y. Shengxiang (Eds.), "Evolutionary Computation in Dynamic and Uncertain Environments", Series on Studies in Computational Intelligence, vol. 51, 565-582, Springer, 2007.

Publicações em revistas científicas com arbitragem

Alves, M. J., J. Clímaco, C. Henggeler Antunes, H. Jorge, A. G. Martins. "Stability analysis of efficient solutions in multiobjective integer programming: a case study in load management". Computers and Operations Research, vol. 35, issue 1, 186-197, 2008.

Gomes, A., C. Henggeler Antunes, A. Martins. "A multiple objective approach to electric load management using an interactive evolutionary algorithm". IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 3, 1004-1011, 2007.

Gomes, A., C. Henggeler Antunes, A. Martins.. "Design of an Adaptive Mutation Operator in an Electrical Load Management Case Study". Computers and Operations Research, vol. 35, issue 9, 2925 – 2936, 2008.

Madlener, R., C. Henggeler Antunes, L. Dias. "Assessing the performance of biogas plants with multi-criteria and data envelopment analysis". European Journal of Operational Research (aceite para publicação).

Neves, L., A. Martins, C. Henggeler Antunes, L. Dias. "A multi-criteria decision approach to sorting actions for promoting energy efficiency". Energy Policy, vol. 36, issue 7, 2351-2363, 2008.

Oliveira, C. C. Henggeler Antunes. "A multiple objective model to deal with E3 problems". IASME Transactions on Power Systems, issue 3, vol. 2, 317-324, 2005.

Oliveira, C. C. Henggeler Antunes. "An interactive method to tackle uncertainty in interval multiple objective linear programming". Journal of Mathematical Sciences (aceite para publicação).

Oliveira, C., C. Henggeler Antunes. "Multiple objective linear programming models with interval coefficients – an illustrated overview". *European Journal of Operational Research*, vol. 181, nº 3, 1434-1463, 2007.

Publicações em actas de eventos científicos com arbitragem

Barrico, C., C. Henggeler Antunes. "A New Approach to Robustness Analysis in Multi-Objective Optimization". *Proceedings of the MOPGP'06 - 7th International Conference on Multi-Objective Programming and Goal Programming*, Tours, França, Junho 2006.

Barrico, C., C. Henggeler Antunes. "Robustness Analysis in Evolutionary Multi-Objective Optimization – with a Case Study in Electrical Distribution Networks". *II European-Latin-American Workshop on Engineering Systems (SELASI II)*, Junho 2006, Porto (em CD-ROM).

Barrico, C., C. Henggeler Antunes. "Robustness Analysis in Multi-Objective Optimization Using a Degree of Robustness Concept". *Proceedings of the 2006 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 6778-6783, Vancouver, Canadá, Julho 2006.

Borges, A. R., C. Henggeler Antunes. "Stability analysis of multiple objective linear programming models to the introduction of new decision variables". *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC2007)*, 559-564, Montreal, Canadá, Outubro 2007 (em CD-ROM).

Borges, A. R., C. Henggeler Antunes. "Stability of efficient solutions against weight changes in multi-objective linear programming models". *Proceedings of the MOPGP'06 - 7th International Conference on Multi-Objective Programming and Goal Programming*, Tours, França, Junho 2006.

Borges, A. R., C. Henggeler Antunes. "Tolerance and critical regions of reference points: a study of bi-objective linear programming models". *Proceedings of the 11th IPMU – International Conference on Uncertainty Modelling in Knowledge-Based Systems*, Paris, Julho 2006.

Clímaco, J., J. Craveirinha, C. Henggeler Antunes. "Note on the role of strategic power planning in a deregulated environment". *Proceedings of the 19th Mini-EURO Conference*; C. Henggeler Antunes and A. Gomes (Eds.), Setembro 2006, Coimbra (em CD-ROM).

Coelho, D., C. Henggeler Antunes, A. G. Martins, "Decision Support for Integrated Urban Energy Planning – a multiple-criteria framework", *Fifth European Conference on Sustainable Cities & Towns*, 2007, Sevilha, Espanha.

Coelho, D., C. Henggeler Antunes, A. G. Martins. "Multicriteria decision support in urban energy planning". *9th IAEE European Energy Conference*, Florença, Itália, Junho 2007.

Coelho, D., C. Henggeler Antunes, A. G. Martins. "Using SSM for Structuring Decision Support in Urban Energy Planning". *Posters and Doctoral Colloquium Proceedings of the IFIP TC8/WG8.3 Working Conference - International Conference on Collaborative Decision Making (CDM'08)*, July 2008, Toulouse, France (in CD-ROM).

Gomes, A., C. Henggeler Antunes, A. G. Martins. "An Evolutionary Algorithm for Tackling Dynamic Environments in Power Systems Problems". *MIC 2007 - The 7th Metaheuristics International Conference*, Montreal, Canadá, Junho 2007.

Henggeler Antunes, C., A. Gomes, A. G. Martins. "A two-phase decision support approach for the selection of load control actions". *Proceedings of the IEEE Europe 2008 - International Engineering Management Conference*, 41-45, Estoril, Portugal, Junho 2008.

Henggeler Antunes, C., S. Lucas, J. Clímaco. "Robust solutions for MOLP problems using interval programming". *Proceedings of the 11th IPMU - International Conference on Uncertainty Modelling in Knowledge-Based Systems*, Paris, Julho 2006.

Madlener, R., C. Henggeler Antunes, L. Dias. "Combining data envelopment analysis and multi-criteria analysis for assessing the performance of cogeneration plants". *9th IAEE European Energy Conference*, Florença, Itália, Junho 2007.

Madlener, R., C. Henggeler Antunes, L. Dias. "Multi-criteria versus data envelopment analysis for assessing the performance of biogas plants". Proceedings of the 19th Mini-EURO Conference; C. Henggeler Antunes and A. Gomes (Eds.), Setembro 2006, Coimbra (em CD-ROM). Uma versão revista e expandida deste texto foi aceite para publicação no European Journal of Operational Research.

Oliveira, C., C. Henggeler Antunes. "A multiobjective E3 model with uncertain data". 9th IAEE European Energy Conference, Florence, Italy, June 2007.

Oliveira, C., C. Henggeler Antunes. "A multiobjective model with uncertain data for macroeconomic-energy-environment studies". 29th IAEE International Conference, Potsdam, Alemanha, Junho 2006.

Oliveira, C., C. Henggeler Antunes. "An interactive procedure to tackle uncertainty in MOLP with interval coefficients". Proceedings of the MOPGP'06 - 7th International Conference on Multi-Objective Programming and Goal Programming, Tours, França, Junho 2006.

Pereira da Silva, P., "Building a regional market: evidence from the electricity supply industry", International Network for Economic Research (INFER) Conference on Integration and Globalization, Coimbra, Portugal, June 2007.

Pereira da Silva, P., "Impact of dimensional and location aspects on the financial behaviour of energy markets". 9th IAEE European Energy Conference, Florence, Italy, June 2007.

Pereira da Silva, P., I. Soares. "Determinants of the financial behaviour of energy markets", 4th European Congress on Economics and Management of Energy in Industry (ECEMEI), Porto, Portugal, November, 2007.

Pires, D. F., C. Henggeler Antunes, A. G. Martins. "An NSGA-II based approach to VAR planning in radial distribution networks". MIC 2007 - The 7th Metaheuristics International Conference, Montreal, Canadá, Junho 2007.

Pires, D. F., C. Henggeler Antunes, A. G. Martins. "Multi-objective evolutionary approaches for reactive power planning in electrical networks – an overview". Powereng - International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Setúbal, Abril 2007.

Apresentações em eventos científicos (apenas se mencionam nesta secção os que não deram origem a publicação em actas)

Dias, L., C. Henggeler Antunes, R. Madlener. "Multi-criteria and data envelopment analysis for assessing the performance of biogas plants". 22nd European Conference on Operational Research EURO XX, Praga, República Checa.

Fulga, C., C. Henggeler Antunes. "Decentralized Method for Multiobjective Optimization". Conferência Internacional Optimization 2007, Porto.

Henggeler Antunes, C., "CO2 e os novos paradigmas da energia", lição convidada no Encontro CO2 nas Indústrias de Altas Temperaturas (CIAT), 16 de Dezembro de 2005, Universidade de Aveiro.

Oliveira, C., C. Henggeler Antunes. "Energy-environment modeling – a multiobjective approach to deal with uncertain coefficients". XVIIIth International Conference on Multiple Criteria Decision Making, Chania, Grécia, Junho 2006

Oliveira, C., C. Henggeler Antunes. "Multi-objective approaches for Energy-Economy-Environment studies". 22nd European Conference on Operational Research EURO XX, Praga, República Checa.

Teses de Doutoramento

Carla Oliveira, "Modelos input-output multiobjectivo com coeficientes intervalares para o estudo das interações economia-energia-ambiente". Tese de Doutoramento em

Engenharia Electrotécnica, especialidade de Optimização e Teoria dos Sistemas, Universidade de Coimbra (a submeter no início de Outubro 2008).

Solange Lucas, “Gestão da incerteza em modelos de programação linear multi-objectivo com coeficientes intervalares”. Tese de Doutoramento em Engenharia Electrotécnica, especialidade de Optimização e Teoria dos Sistemas, Universidade de Coimbra (aguarda marcação de provas).

Dulce Coelho, “Apoio à Decisão em Planeamento Energético Urbano Integrado”. Tese de Doutoramento em Engenharia Electrotécnica, especialidade de Sistemas de Energia, Universidade de Coimbra (em curso).

1. Introdução

Este relatório final documenta os trabalhos desenvolvidos no âmbito do Projecto “Modelos Multiobjectivo Input-Output para Estudo das Interações Energia-Ambiente-Economia” (POCI/ENR/57082/2004) durante os 36 meses da sua duração, entre 1.9.2005 e 31.8.2008.

O trabalho de I&D realizado neste projecto comportou duas vertentes fundamentais:

- uma de natureza mais aplicada relacionada com o contexto do estudo das interações entre os sistemas energético, económico e ambiental que conduziu à construção de modelos de programação linear baseados em análise input-output considerando explicitamente múltiplas funções objectivo, e
- uma outra, de natureza mais teórica e metodológica, relativa ao desenvolvimento de algoritmos de programação matemática tendo em conta a incerteza associada aos dados de entrada dos modelos no sentido da obtenção de conclusões robustas.

Na vertente de construção de modelos matemáticos foram desenvolvidos novos modelos e aperfeiçoados modelos anteriormente propostos de programação linear multiobjectivo, para o estudo das interações entre o sistema energético, os impactes ambientais e a economia a nível nacional. O desenvolvimento destes modelos insere-se numa linha de pesquisa da equipa de investigação do projecto, procurando ajustá-los de forma cada vez mais precisa à realidade nacional (mas replicáveis noutros contextos de análise) através quer da recolha de dados mais actualizados e fiáveis, quer sobretudo da introdução de novos elementos, à custa da formulação de versões mais sofisticadas das variáveis de decisão, das restrições e das funções objectivo que melhorem a adequação do modelo à realidade e, conseqüentemente, a possibilidade de dele extrair conclusões com significado face à situação em análise. Estes modelos de programação linear multiobjectivo são baseados na estrutura linear das relações de produção inter/intra-industriais (análise input-output). O principal valor acrescentado dos modelos desenvolvidos neste projecto é permitirem aos decisores considerar múltiplos, conflituosos e incomensuráveis aspectos de avaliação do mérito das soluções potenciais, revelando os compromissos (*trade-offs*) associados a estratégias energéticas sustentáveis, ao crescimento económico, ao bem-estar social e às preocupações ambientais.

Na vertente de tratamento da incerteza, associada aos coeficientes dos modelos de programação multiobjectivo, foram desenvolvidas técnicas algorítmicas, de natureza interactiva, para tirar partido da informação sobre as preferências do decisor para limitar o esforço computacional, para o cálculo de soluções robustas. Dada a dimensão e complexidade destes modelos, bem como a imprecisão intrínseca associada aos dados, a caracterização de soluções robustas (i.e., o mais possível “imunes” às diversas fontes de incerteza), foram desenvolvidos algoritmos originais, dedicados ao cálculo de soluções robustas quando os coeficientes do modelo de programação linear multiobjectivo são expressos através de números intervalares. Esta forma de modelação da incerteza é particularmente interessante porque não pressupõe o conhecimento de distribuições de probabilidade, como em programação estocástica, ou de funções membro, como em programação difusa. Os algoritmos de programação intervalar foram desenvolvidos tendo em conta a respectiva aplicabilidade em modelos de alguma dimensão, cujos coeficientes derivam de matrizes input-output. As técnicas de tratamento da incerteza foram ainda estendidas a problemas combinatórios multiobjectivo usando abordagens de programação evolucionária / algoritmos genéticos.

Algumas das vias de investigação teórica e metodológica suscitadas por esta vertente da actividade do projecto foram exploradas noutros problemas do sector energético relacionados com o tópico principal do projecto (o estudo das interações energia-ambiente-economia). Assim, foi explorado o desenvolvimento de modelos de programação inteira multiobjectivo para apoio à tomada de decisões em problemas de controlo directo de cargas no quadro de

acções de gestão da procura de energia eléctrica, de técnicas integrando Data Envelopment Analysis e análise multicritério para avaliação de eficiência das unidades de biogás, de estudos dos mercados de electricidade, e de modelos de apoio à decisão para planeamento energético integrado local.

As principais áreas de investigação e desenvolvimento prosseguidas no âmbito do projecto são em seguida brevemente descritas, com referência para as publicações científicas (que podem ser consultadas nos anexos a este relatório). São ainda mencionadas as teses de doutoramento enquadradas pelo projecto, a organização de números especiais de revistas científicas, a organização de sessões em conferências internacionais e a participação em eventos científicos.

Como nota final, refira-se que a candidatura deste projecto previa um orçamento total de 76745 euros. Este montante foi reduzido pelo painel de avaliação para 15000 euros, durante três anos (ou seja, uma redução de mais de 80%), apesar da experiência e resultados anteriores de reconhecido nível obtidos pela equipa de investigação nesta área. Apesar desta injustificável redução do financiamento, e mesmo tendo em conta que nem todas as vias de investigação propostas na candidatura puderam ser prosseguidas por esse motivo, os indicadores de realização física situam-se num nível que julgamos de qualidade, que pode ser aferida pela quantidade e local de publicação dos artigos. Esperamos que os resultados alcançados com tão escasso financiamento contribuam para credibilizar a equipa de investigação face a novas candidaturas de projectos nesta área, de modo a evitar uma avaliação tão superficial como aquela de que fomos alvo neste caso.

2. Áreas de investigação e desenvolvimento

2.1. Construção de modelos matemáticos multiobjectivo para o estudo das interações energia-economia-ambiente (E3 – *energy-economy-environment*) baseados em análise input-output

Foram desenvolvidos novos modelos, bem como aperfeiçoados modelos anteriormente propostos por membros da equipa de investigação do projecto, de programação matemática com múltiplas funções objectivo, para o estudo das interações entre o sistema energético, os impactes ambientais e a economia a nível nacional. Esta actividade do projecto beneficiou da experiência da equipa de investigação, tendo o esforço de I&D sido dirigido para a formulação de versões mais sofisticadas das variáveis de decisão, das restrições e das funções objectivo de modo a melhorar a adequação do modelo à realidade nacional (embora replicável noutros contextos de análise). A recolha de dados actualizados e fiáveis junto de instituições diversas (INE, DGGE, OCDE, IPCC, etc.) ocupou também uma parte significativa do esforço de I&D. A sofisticação dos modelos e a sua instanciação com dados actualizados é essencial para reforçar as possibilidades de deles extrair conclusões com significado face à situação em análise, em particular relativamente a Portugal. Estes modelos de programação linear multiobjectivo são baseados na estrutura linear das relações de produção inter/intra-industriais (análise input-output). O principal valor acrescentado dos modelos desenvolvidos neste projecto é permitirem aos decisores considerar múltiplos, geralmente conflituosos, aspectos de avaliação do mérito das soluções potenciais, revelando os compromissos (*trade-offs*) associados a estratégias energéticas sustentáveis, ao crescimento económico, ao bem-estar social e às preocupações ambientais.

Os resultados alcançados estão documentados em:

Oliveira, C. C. Henggeler Antunes. "A multiple objective model to deal with E3 problems". IASME Transactions on Power Systems, issue 3, vol. 2, 317-324, 2005.

Oliveira, C., "Modelos input-output multiobjectivo com coeficientes intervalares para o estudo das interações economia-energia-ambiente". Tese de Doutoramento em Engenharia Electrotécnica, especialidade de Optimização e Teoria dos Sistemas, Universidade de Coimbra (em fase de produção, a submeter no início de Outubro 2008).

Oliveira, C., C. Henggeler Antunes. “A multiobjective E3 model with uncertain data”. 9th IAEE European Energy Conference, Florence, Italy, June 2007.

Oliveira, C., C. Henggeler Antunes. “A multiobjective model with uncertain data for macroeconomic-energy-environment studies”. 29th IAEE International Conference, Potsdam, Alemanha, Junho 2006.

Oliveira, C., C. Henggeler Antunes. “Energy-environment modeling – a multiobjective approach to deal with uncertain coefficients”. XVIIIth International Conference on Multiple Criteria Decision Making, Chania, Grécia, Junho 2006

Oliveira, C., C. Henggeler Antunes. “Multi-objective approaches for Energy-Economy-Environment studies”. 22nd European Conference on Operational Research EURO XX, Praga, República Checa.

2.2. Tratamento da incerteza com vista à obtenção de soluções robustas em modelos de programação matemática multiobjectivo

Na vertente de tratamento da incerteza, associada aos dados de entrada dos modelos matemáticos multiobjectivo, foram desenvolvidas técnicas algorítmicas para o cálculo de soluções robustas, com particular interesse em técnicas interactivas que permitam tirar partido do conhecimento e preferências do decisor para evitar pesquisas exaustivas e assim reduzir o esforço computacional associado. Dada a dimensão e complexidade destes modelos, bem como a imprecisão associada aos dados, a caracterização de soluções robustas (i.e., o mais possível “imunes” às diversas fontes de incerteza) foi uma via de investigação essencial deste projecto. Assim, foram desenvolvidos algoritmos originais, dedicados ao cálculo de soluções robustas quando os coeficientes do modelo matemático multiobjectivo são expressos através de números intervalares. Esta forma de modelação da incerteza é particularmente interessante porque não pressupõe o conhecimento de distribuições de probabilidade, como em programação estocástica, ou de funções membro, como em programação difusa (“fuzzy”). Os algoritmos de programação intervalar foram desenvolvidos tendo em conta a respectiva aplicabilidade em modelos de alguma dimensão e complexidade, cujos coeficientes derivam de matrizes input-output.

As soluções robustas caracterizam-se por ter um bom desempenho, de acordo com as múltiplas funções objectivo, em diferentes cenários associados aos coeficientes intervalares do modelo matemático. Por exemplo, as soluções robustas podem ser caracterizadas como minimizando o pior desvio possível de cada função objectivo em relação a uma solução ideal intervalar (estratégia *minmax*). Este “ponto de referência” intervalar corresponde ao melhor valor óptimo individual obtido com o conjunto de coeficientes mais favorável ou com o conjunto de coeficientes mais desfavorável. Os cenários “pior caso” e “melhor caso” são tidos em conta para revelar os riscos e oportunidades em jogo; ou seja, estes cenários permitem perceber os “*trade-offs*” quer entre os valores das funções objectivo, quer entre os graus de robustez das soluções nos diferentes cenários. Assim, esta abordagem metodológica fornece não apenas informação associada às soluções eficientes (output dos sectores de actividade, valor acrescentado bruto, nível de emprego, valor das exportações e das importações, consumo privado, PIB, défice público, potencial de aquecimento global, potencial de acidificação, etc.) mas também uma caracterização da respectiva robustez face a dados incertos.

Esta via de investigação potenciou a exploração de tópicos de natureza teórica e metodológica na área da programação intervalar e da análise de estabilidade de soluções não dominadas em modelos de programação multiobjectivo, incluindo modelos combinatorios com abordagens de programação evolucionária.

Os resultados alcançados estão documentados em:

Barrico, C., C. Henggeler Antunes. “A New Approach to Robustness Analysis in Multi-Objective Optimization”. Proceedings of the MOPGP’06 - 7th International Conference on Multi-Objective Programming and Goal Programming, Tours, França, Junho 2006.

Barrico, C., C. Henggeler Antunes. “An Evolutionary Approach for Assessing the Degree of Robustness of Solutions to Multi-Objective Models”. In: Y. S. Ong, J. Yaochu, Y.

Shengxiang (Eds.), “Evolutionary Computation in Dynamic and Uncertain Environments”, Series on Studies in Computational Intelligence, vol. 51, 565-582, Springer, 2007.

Barrico, C., C. Henggeler Antunes. “Robustness Analysis in Multi-Objective Optimization Using a Degree of Robustness Concept”. Proceedings of the 2006 IEEE Congress on Evolutionary Computation, 6778-6783, Vancouver, Canadá, Julho 2006.

Borges, A. R., C. Henggeler Antunes. “Stability analysis of multiple objective linear programming models to the introduction of new decision variables”. Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC2007), 559-564, Montreal, Canadá, Outubro 2007 (em CD-ROM).

Borges, A. R., C. Henggeler Antunes. “Stability of efficient solutions against weight changes in multi-objective linear programming models”. Proceedings of the MOPGP’06 - 7th International Conference on Multi-Objective Programming and Goal Programming, Tours, França, Junho 2006.

Borges, A. R., C. Henggeler Antunes. “Tolerance and critical regions of reference points: a study of bi-objective linear programming models”. Proceedings of the 11th IPMU – International Conference on Uncertainty Modelling in Knowledge-Based Systems, Paris, Julho 2006.

Fulga, C., C. Henggeler Antunes. “Decentralized Method for Multiobjective Optimization”. Conferência Internacional Optimization 2007, Porto.

Henggeler Antunes, C., S. Lucas, J. Clímaco. “Robust solutions for MOLP problems using interval programming”. Proceedings of the 11th IPMU - International Conference on Uncertainty Modelling in Knowledge-Based Systems, Paris, Julho 2006.

Lucas, S., “Gestão da incerteza em modelos de programação linear multi-objectivo com coeficientes intervalares”. Tese de Doutoramento em Engenharia Electrotécnica, especialidade de Optimização e Teoria dos Sistemas, Universidade de Coimbra (aguarda marcação de provas).

Oliveira, C. C. Henggeler Antunes. “An interactive method to tackle uncertainty in interval multiple objective linear programming”. Journal of Mathematical Sciences (aceite para publicação).

Oliveira, C., C. Henggeler Antunes. “An interactive procedure to tackle uncertainty in MOLP with interval coefficients”. Proceedings of the MOPGP’06 - 7th International Conference on Multi-Objective Programming and Goal Programming, Tours, França, Junho 2006.

Oliveira, C., C. Henggeler Antunes. “Multiple objective linear programming models with interval coefficients – an illustrated overview”. European Journal of Operational Research, vol. 181, nº 3, 1434-1463, 2007.

2.3. Outras vias de I&D exploradas no âmbito do projecto

Nesta secção documentam-se as vias de investigação suscitadas pelas actividades de I&D do projecto, quer de natureza teórica e metodológica, quer no que se refere à respectiva aplicação a outros problemas do sector energético. Assim, foi explorado o desenvolvimento de modelos de programação inteira multiobjectivo para apoio à tomada de decisões em problemas de controlo directo de cargas no quadro de acções de gestão da procura de energia eléctrica, de técnicas integrando Data Envelopment Analysis e análise multicritério para avaliação de eficiência das unidades de biogás, de estudos dos mercados de electricidade, e de modelos de apoio à decisão para planeamento energético integrado local.

2.3.1. Modelos combinatórios multiobjectivo para apoio à tomada de decisões em problemas de controlo directo de cargas

Foram desenvolvidos modelos de programação inteira multiobjectivo para apoio à tomada de decisões em problemas de controlo directo de cargas, no quadro de acções de gestão da procura de energia eléctrica em redes de distribuição, explorando os compromissos entre benefícios económicos e aspectos operacionais, num cenário de liberalização do sector eléctrico. As acções de gestão da procura, mesmo em cenários caracterizados pela

liberalização do sector eléctrico, mantêm a sua atractividade, devido a questões operacionais, benefícios económicos e impactes ambientais a elas associados. Foram realizadas experiências computacionais, utilizando com dados reais provenientes de auditorias, com modelos multiobjectivo de programação linear inteira mista considerando como objectivos a otimizar a minimização da ponta pedida à rede a três níveis de agregação das cargas, a maximização do lucro, a minimização do desconforto imposto aos clientes pelo deslastre das cargas - considerando quer a soma de todas as interrupções, quer a mais longa interrupção – e a minimização do factor de perdas. A consideração de todos estes aspectos permite adaptar este modelo às diversas entidades intervenientes no mercado de electricidade (distribuidores, comercializadores, etc.). Para tratar este problema complexo de natureza combinatória foram desenvolvidas novas abordagens baseadas em programação evolucionária / algoritmos genéticos para problemas multiobjectivo. Este trabalho levou a desenvolvimentos de natureza algorítmica para caracterização da fronteira de soluções eficientes, incluindo mecanismos de incorporação das preferências dos decisores para orientação da pesquisa e avanços conceptuais na área dos operadores adaptativos em abordagens de programação genética/evolucionária.

Os resultados alcançados estão documentados em:

Alves, M. J., J. Clímaco, C. Henggeler Antunes, H. Jorge, A. G. Martins. "Stability analysis of efficient solutions in multiobjective integer programming: a case study in load management". *Computers and Operations Research*, vol. 35, issue 1, 186-197, 2008.

Barrico, C., C. Henggeler Antunes. "Robustness Analysis in Evolutionary Multi-Objective Optimization – with a Case Study in Electrical Distribution Networks". II European-Latin-American Workshop on Engineering Systems (SELASI II), Junho 2006, Porto (em CD-ROM).

Gomes, A., C. Henggeler Antunes, A. G. Martins. "An Evolutionary Algorithm for Tackling Dynamic Environments in Power Systems Problems". MIC 2007 - The 7th Metaheuristics International Conference, Montreal, Canadá, Junho 2007.

Gomes, A., C. Henggeler Antunes, A. Martins. "A multiple objective approach to electric load management using an interactive evolutionary algorithm". *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 3, 1004-1011, 2007.

Gomes, A., C. Henggeler Antunes, A. Martins.. "Design of an Adaptive Mutation Operator in an Electrical Load Management Case Study". *Computers and Operations Research*, vol. 35, issue 9, 2925 – 2936, 2008.

Henggeler Antunes, C., A. Gomes, A. G. Martins. "A two-phase decision support approach for the selection of load control actions". *Proceedings of the IEEE Europe 2008 - International Engineering Management Conference*, 41-45, Estoril, Portugal, Junho 2008.

Pires, D. F., C. Henggeler Antunes, A. G. Martins. "An NSGA-II based approach to VAR planning in radial distribution networks". MIC 2007 - The 7th Metaheuristics International Conference, Montreal, Canadá, Junho 2007.

Pires, D. F., C. Henggeler Antunes, A. G. Martins. "Multi-objective evolutionary approaches for reactive power planning in electrical networks – an overview". *Powereng - International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Setúbal, Abril 2007.

2.3.2. Avaliação de eficiência energética usando análise multicritério e/ou *Data Envelopment Analysis*

Foram desenvolvidas metodologias para a avaliação de eficiência das unidades de biogás, usando critérios de natureza económica, de produção energética e ambiental. Este trabalho tem sido realizado em colaboração com colegas suíços e austríacos, com dados reais fornecidos por entidades austríacas. Para além do interesse e relevância da aplicação, esta via de investigação tem proporcionado resultados inovadores a nível metodológico, no que diz respeito ao uso de técnicas de análise multicritério (na perspectiva do problema de classificação) baseadas em relações de prevalência (*outranking*) para complementar as técnicas baseadas em *Data Envelopment Analysis* para a avaliação de eficiência de unidades organizacionais (usando as unidades de produção de biogás como estudo de caso).

No âmbito do desenvolvimento de modelos multicritério para a problemática de classificação foi também desenvolvido um trabalho sobre a avaliação de iniciativas para a promoção da eficiência no consumo de energia eléctrica, desenvolvendo um sistema de apoio à decisão baseado na *package* IRIS para entidades que estejam envolvidas nestas tarefas (por exemplo, reguladores, agências de energia, empresas de serviço de energia).

Os resultados alcançados estão documentados em:

Dias, L., C. Henggeler Antunes, R. Madlener. "Multi-criteria and data envelopment analysis for assessing the performance of biogas plants". 22nd European Conference on Operational Research EURO XX, Praga, República Checa.

Madlener, R., C. Henggeler Antunes, L. Dias. "Assessing the performance of biogas plants with multi-criteria and data envelopment analysis". European Journal of Operational Research (aceite para publicação).

Madlener, R., C. Henggeler Antunes, L. Dias. "Combining data envelopment analysis and multi-criteria analysis for assessing the performance of cogeneration plants". 9th IAEE European Energy Conference, Florença, Itália, Junho 2007.

Madlener, R., C. Henggeler Antunes, L. Dias. "Multi-criteria versus data envelopment analysis for assessing the performance of biogas plants". Proceedings of the 19th Mini-EURO Conference; C. Henggeler Antunes and A. Gomes (Eds.), Setembro 2006, Coimbra (em CD-ROM). Uma versão revista e expandida deste texto foi aceite para publicação no European Journal of Operational Research.

Neves, L., A. Martins, C. Henggeler Antunes, L. Dias. "A multi-criteria decision approach to sorting actions for promoting energy efficiency". Energy Policy, vol. 36, issue 7, 2351-2363, 2008.

2.3.3. Mercados de electricidade

Foi desenvolvido trabalho relacionado com os mercados de electricidade no sentido de aprofundar o conhecimento do processo de reestruturação da indústria da electricidade no contexto de transformação do sistema regulatório e da introdução da concorrência, para depois proceder a uma análise crítica da experiência internacional, incluindo o caso do MIBEL. O trabalho recorre essencialmente a modelos de heteroscedasticidade condicional auto-regressiva avaliando a evolução temporal do comportamento dos preços *spot* nalguns mercados de energia da União Europeia. Recorrendo a modelos econométricos, foi ainda investigada a eventual existência de integração entre alguns mercados, a fim de aferir o actual estágio de construção do Mercado Interno Europeu de Electricidade.

Os resultados alcançados estão documentados em:

Pereira da Silva, Patrícia. "O Sector da Energia Eléctrica na União Europeia", Imprensa da Universidade de Coimbra, 2007 (ISBN: 978-989-8074-15-7).

Pereira da Silva, P., "Building a regional market: evidence from the electricity supply industry", International Network for Economic Research (INFER) Conference on Integration and Globalization, Coimbra, Portugal, June 2007.

Pereira da Silva, P., "Impact of dimensional and location aspects on the financial behaviour of energy markets". 9th IAEE European Energy Conference, Florence, Italy, June 2007.

Pereira da Silva, P., I. Soares. "Determinants of the financial behaviour of energy markets", 4th European Congress on Economics and Management of Energy in Industry (ECEMEI), Porto, Portugal, November, 2007.

2.3.4. Planeamento energético integrado local

Nesta via de investigação, que enquadra um doutoramento em curso, foi prosseguido o desenvolvimento de uma metodologia que forneça um conjunto de informação detalhada, útil ao processo de apoio multiobjectivo à decisão na definição de estratégias de planeamento energético urbano integrado. Esta metodologia é orientada para uma gestão energética e ambiental, especialmente através do incremento da eficiência energética e da exploração de recursos locais (energias renováveis), visando um caminho para o desenvolvimento urbano sustentável. O uso desta metodologia poderá tornar-se de grande utilidade não só para os agentes de decisão mas também para outros actores (cidadãos, agências de energia,

investidores, agentes de mercado e empresas de distribuição de energia) envolvidos no planeamento energético, uma vez que se pretende também desenvolver um guia de acção para a implementação das opções seleccionadas para o sistema energético urbano.

Os resultados alcançados estão documentados em:

Coelho, D., C. Henggeler Antunes, A. G. Martins, “Decision Support for Integrated Urban Energy Planning – a multiple-criteria framework”, Fifth European Conference on Sustainable Cities & Towns, 2007, Sevilha, Espanha.

Coelho, D., C. Henggeler Antunes, A. G. Martins. “Multicriteria decision support in urban energy planning”. 9th IAEE European Energy Conference, Florença, Itália, Junho 2007.

Coelho, D., C. Henggeler Antunes, A. G. Martins. “Using SSM for Structuring Decision Support in Urban Energy Planning”. Posters and Doctoral Colloquium Proceedings of the IFIP TC8/WG8.3 Working Conference - International Conference on Collaborative Decision Making (CDM’08), July 2008, Toulouse, France (in CD-ROM).

2.3.5. Outros trabalhos

Este projecto permitiu ainda desenvolver algum trabalho de I&D sobre política energética e aplicações de técnicas de investigação operacional e de apoio multicritério à tomada de decisão em problemas no sector energético.

Este vector da actividade do projecto está documentado em:

Henggeler Antunes, C., “CO2 e os novos paradigmas da energia”, lição convidada no Encontro CO2 nas Indústrias de Altas Temperaturas (CIAT), 16 de Dezembro de 2005, Universidade de Aveiro.

Clímaco, J., J. Craveirinha, C. Henggeler Antunes. “Note on the role of strategic power planning in a deregulated environment”. Proceedings of the 19th Mini-EURO Conference; C. Henggeler Antunes and A. Gomes (Eds.), Setembro 2006, Coimbra (em CD-ROM).

3. Teses de Doutoramento

Este projecto enquadró os trabalhos de I&D conducentes à apresentação de três teses de doutoramento na Universidade de Coimbra:

Carla Oliveira, “Modelos input-output multiobjectivo com coeficientes intervalares para o estudo das interacções economia-energia-ambiente”. Tese de Doutoramento em Engenharia Electrotécnica, especialidade de Optimização e Teoria dos Sistemas, Universidade de Coimbra (em fase de produção, a submeter no início de Outubro 2008).

Solange Lucas, “Gestão da incerteza em modelos de programação linear multiobjectivo com coeficientes intervalares”. Tese de Doutoramento em Engenharia Electrotécnica, especialidade de Optimização e Teoria dos Sistemas, Universidade de Coimbra (aguarda marcação de provas).

Dulce Coelho, “Apoio à Decisão em Planeamento Energético Urbano Integrado”. Tese de Doutoramento em Engenharia Electrotécnica, especialidade de Sistemas de Energia, Universidade de Coimbra (em curso).

4. Edição de *special issues* de revistas científicas

Este projecto enquadró a organização de números especiais das revistas científicas *European Journal of Operational Research*, *Energy Policy* e *International Journal of Energy Sector Management*, co-editados por Carlos Henggeler Antunes e Álvaro Gomes, dedicadas ao tema “Operational Research Models and Methods in the Energy Sector”. Esta actividade resultou da organização da conferência internacional 19th Mini EURO Conference on Operational Research Models and Methods in the Energy Sector - ORMMES 2006, realizada na Universidade de Coimbra, entre 6 e 8 de Setembro de 2006, no âmbito das actividades do projecto POCTI/ESE/38422/2001. A qualidade das comunicações apresentadas neste evento

deu origem a convites dos editores destas revistas científicas para a organização dos números especiais, com base nas contribuições revistas submetidas pelos autores, alvo de um processo de revisão pelos pares.

Assim, foram organizados os seguintes números especiais:

Special Section Operational research models and methods in the energy sector. C. Henggeler Antunes, A. Gomes (Guest-Editors), Energy Policy, vol. 36, issue 7, 2293-2459, July 2008. [Inclui o texto: Henggeler Antunes, C., A. Gomes. *Operational research models and methods in the energy sector—Introduction to the special issue*, Energy Policy, vol. 36, issue 7, 2293-2295, July 2008]

Feature cluster Operational research models and methods in the energy sector. C. Henggeler Antunes, A. Gomes (Eds.). European Journal of Operational Research [disponível no site da Elsevier, aguarda publicação].

Special issue Operational research models and methods in the energy sector. C. Henggeler Antunes, A. Gomes (Eds.). International Journal of Energy Sector Management, vol. 2, no. 3, 2008. [Inclui o texto: Henggeler Antunes, C., A. Gomes. *Guest Editorial*, International Journal of Energy Sector Management, vol. 2, no. 3, 314-317, 2008]

5. Organização de sessões em conferências

No quadro das actividades do projecto, Carlos Henggeler Antunes organizou uma sessão na Conferência EURO XXII - 22nd European Conference on Operational Research, Praga, República Checa, Julho 2007, com o tema “MCDA/MOP in the Energy Sector”, incluindo as seguintes apresentações:

G. Mavrotas, D. Diakoulaki, G. Paraskevas, K. Florios, “Energy planning in buildings under demand uncertainty using multi-objective programming and the minimax regret criterion: an implementation in GAMS”.

C. Oliveira, C. Henggeler Antunes. “Multi-objective approaches for Energy-Economy-Environment studies”.

L. Dias, C. H. Antunes, R. Madlener. “Multi-criteria and data envelopment analysis for assessing the performance of biogas plants”.

Encontra-se também em planeamento uma sessão, co-organizada com colegas suíços e alemães, sobre modelos energético-ambientais integrada na Conferência EURO XXIII - 23rd European Conference on Operational Research, a realizar em Bona, Alemanha, em Julho 2009.

6. Participação em eventos científicos com apresentação de comunicações (acima mencionadas)

29th IAEE - International Association for Energy Economics - International Conference, Potsdam, Alemanha, Junho 2006 - Carla Oliveira.

12º Congresso da APDIO – Associação Portuguesa de Investigação Operacional, Lisboa, Outubro 2006 - Carla Oliveira, Carlos Henggeler Antunes.

XVIIIth International Conference on Multiple Criteria Decision Making, Chania, Grécia, Junho 2006 - Carla Oliveira.

- Iberian Conference in Optimization, Coimbra, Novembro 2006 - Carlos Henggeler Antunes.

MOPGP’06 - 7th International Conference on Multi-Objective Programming and Goal Programming, Tours, França, Junho 2006 - Carla Oliveira.

19th Mini-EURO Conference on Operational Research Models and Methods in the Energy Sector, Coimbra, Setembro 2006 - Dulce Coelho, Carla Oliveira, Carlos Henggeler Antunes.

Fifth European Conference on Sustainable Cities & Towns, 2007, Sevilha, Espanha – Dulce Coelho.

9th IAEE European Energy Conference, Florença, Itália, Junho 2007 - Patrícia Pereira da Silva, Carla Oliveira Henriques, Dulce Coelho.

International Network for Economic Research (INFER) Conference on Integration and Globalization, Coimbra, Junho 2007 - Patrícia Pereira da Silva.

4th European Congress on Economics and Management of Energy in Industry (ECEMEI), Porto, Novembro 2007 - Patrícia Pereira da Silva.

MIC 2007 - The 7th Metaheuristics International Conference, Montreal, Canadá, Junho 2007 - Carlos Henggeler Antunes.

22nd European Conference on Operational Research EURO XX, Praga, República Checa, Junho 2007 - Carlos Henggeler Antunes.

Conferência Internacional Optimization 2007, Julho 2007, Porto - Carlos Henggeler Antunes.

IEMC Europe 2008 - International Engineering Management Conference, 41-45, Estoril, Portugal, Junho 2008 - Carlos Henggeler Antunes.

IFIP TC8/WG8.3 Working Conference - International Conference on Collaborative Decision Making (CDM'08), July 2008, Toulouse, França - Dulce Coelho.