



**GESTÃO DE LAMAS**



**Projecto e optimização de uma rede de valorização de lamas industriais com avaliação de impactes e dano ambiental**

J. DUQUE\*, A. P. F. D. BARBOSA-PÓVOA<sup>2</sup> AND A. Q. NOVAIS<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Unidade de Modelação, Optimização de Sistemas Energéticos, Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Lisboa, Portugal

<sup>2</sup>Centro de Estudos de Gestão, Instituto Superior Técnico, 1049-001, Lisboa, Portugal

joaquim.duque@ineti.pt

O modelo geral aqui apresentado permite otimizar o projecto e a operação de cadeias de reaproveitamento com avaliação dos correspondentes impactes/danos ambientais. Esta modelação é baseada nas metodologias desenvolvidas em engenharia de processos com integração da metodologia de avaliação dos impactes e danos ambientais Eco-indicador 99 [1]. O caso de estudo que o motivou foi o reaproveitamento das lamas ricas em alumínio [2], geradas pelas indústrias de lacagem e anodização de alumínio. Este caso irá servir de teste ao modelo desenvolvido, mas tendo sempre presente a necessidade de manter a generalidade do modelo.

**CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA**

Na caracterização deste problema começa-se pela identificação das entidades que participam na rede, prosseguindo depois para a definição do tipo de rede geral modelado.

**Caracterização das entidades da rede de reaproveitamento**

No tipo de redes em estudo são identificados quatro tipos de entidades: produtores, transformadores, clientes e transportadores, que são caracterizadas da seguinte forma:

**Produtores de resíduos** - representados por "depósitos" de armazenamento (em geral contentores de transporte), que são caracterizados por uma capacidade máxima (ou contratada), uma capacidade mínima, a quantidade de resíduos disponíveis no horizonte de operação e os custos de armazenamento (fixos e variáveis).

A cada produto residual (matéria-prima da rede) está associado um custo de depósito em aterro dedicado, que se traduz no modelo como estimativa do potencial valor económico da matéria-prima;

**Transformadores** - representados por instalações de processamento, que são caracterizadas por uma capacidade instalada e pelos custos (fixos e variáveis) associados às opera-

ções que executam.

Cada entidade de transformação está ligada a dois conjuntos de "depósitos" adequados respectivamente ao armazenamento das matérias-primas que transformam e dos produtos transformados que produzem;

**Clientes** - consomem os produtos transformados e são representados por "depósitos" de armazenamento (em geral contentores de transporte), com custos fixos e variáveis;

A cada Produto final está associado um valor, normalmente inferior ao custo das recursos que substitui;

**Transportadores**, de vários tipos, caracterizados por uma capacidade máxima, uma capacidade mínima, um custo e uma velocidade média.

Para cada tipo de transporte, existem várias capacidades de carga disponíveis (geralmente valores discretos estandardizados).

**Definição da rede de reaproveitamento**

O problema de projecto de redes de aproveitamento pode

ser definido da seguinte forma: Dados:

- Os processos de transformação, armazenagem e transporte disponíveis, materiais envolvidos e tempos de processamento associados (conjunto de tarefas a operar);
- Conjunto de produtos finais utilizáveis (produtos reutilizáveis em processos industriais ou agrícolas, por exemplo, como floculante, fertilizante, etc.);

Uma super-estrutura para a rede a projectar, caracterizada por:

- Um conjunto de entidades produtoras de materiais poluentes, sua localização, quantidade produzida e características dos poluentes;
- Conjunto de entidades transformadoras, localizações, possíveis capacidades, adequação aos processos/receitas de transformação possíveis;
- Conjunto de entidades de transporte, adequação às tarefas de transporte, capacidades, tempos de transporte;
- Conjunto de entidades clien-



- te, consumos pretendidos;
- Topologia global não optimizada da rede e possíveis ligações entre as entidades envolvidas;
- Políticas de reutilização ou de aterro;
- Tipo de operação (horizonte de produção, tempo de ciclo, etc.);
- Políticas de armazenamento.

Valores financeiros associados a:

- Custos de equipamento;
- Custo das matérias-primas, das utilidades e dos transportes;
- Custos operacionais;
- Preço dos produtos. Dados ambientais para:
- Limites da concentração máxima aceitável para cada poluente, impacte ou dano;
- Efeitos potenciais a longo prazo (Aquecimento Global, Rarefacção do Ozono etc.).

Pretende-se determinar:

- Configuração óptima da rede - localização das entidades de transformação e de armazenamento bem como as ligações entre todas as entidades da rede;
- Estratégia óptima de operação - escalonamento de operações, perfis de armazenamento, operações de transporte, valores a processar, valores a colocar em aterro, etc. De forma a otimizar um critério económico ou ambiental.

quantidades substanciais de resíduos que após tratamento local apresentam a forma de lamas ricas nesse metal. Uma alternativa economicamente viável ao depósito em aterro dedicado consiste em tratar essas lamas de forma a poderem ser utilizadas como floculante e coagulante nas estações de tratamento de efluentes industriais e municipais. Dada a dispersão geográfica das diversas entidades da rede, são necessários transportes adequados para garantir a circulação dos diversos produtos e matérias-primas. Cada tarefa de transporte possuiu um impacte ambiental associado que é aqui calculado com base na utilidade consumida (gasóleo). Atendendo a diferenças no conteúdo de poluentes, consideram-se dois tipos de lamas correspondentes aos estados S1 e S2, que os estudos preliminares indicaram poder ser transformadas por operações de diluição ou de secagem [3]. Estas originam respectivamente um produto diluído (S3) e um produto seco (S4), cujas receitas de produção são (Figura 1):

Ambos os estados, S3 e S4, são estáveis e adequados ao tratamento dos efluentes industriais e municipais em diversas localizações geográficas, requerendo, portanto, tarefas de transporte que poderão ser realizadas por dois tipos de transporte alternativos (Tr1, Tr2), diferenciados pelo custo e velocidade. Para a produção considera-se um horizonte temporal de 30 dias e uma operação periódica com ciclos de 5 dias de 24 horas de operação. O exemplo considera todas as ligações possíveis e os tempos de trânsito são calculados a partir da distância entre as entidades

ligadas entre si, assumindo uma velocidade média de 80km/h e 76km/h, respectivamente, para os tipos Tr1 e Tr2. Os custos são calculados com base na distância percorrida à tarifa de 1,8 €/km, enquanto para o segundo tipo de transporte estes valores são reduzidos em 50%. O consumo de gasóleo é estimado em 30 litros/100km, sendo ainda incluídas as variações de consumo devido à carga transportada. O número de entidades da rede pode variar, bem como a sua localização, a qual é considerada a nível distrital. Um diagrama simplificado da rede é mostrado na figura 2.

Os materiais são transportados em contentores estandardizados (de 6, 10 e 20 m<sup>3</sup>), deixados no local, ao custo 40, 40 ou 85€ por mês, respectivamente, sendo o número de camiões, neste exemplo, limitado a 1 por cada tipo de transporte. A questão da importância da inclusão das metodologias de avaliação dos impactes ambientais é avaliada sobre o exemplo que se segue, primeiro com a metodologia MEIM [4], depois com a metodologia eco-indicator 99, o que permite a comparação dos resultados e estatísticas computacionais obtidos.

cada possível local de instalação existe agora a possibilidade de instalar dois tipos de transformadores, (a) e (b), que produzem os mesmos produtos, S3 e S4, com o mesmo processo, diferindo apenas na quantidade e tipo de poluentes emitidos. Esta diferença fica a dever-se, no essencial, ao tipo de utilidades consumidas, atendendo a que o processo de tipo (a) é tecnologicamente menos avançado, usando electricidade na operação de secagem, e os do tipo (b) queimam gasóleo de forma mais eficiente, em termos de energia equivalente. Assim (a) caracteriza-se por níveis de poluição superiores e com menor rendimento, mas com custos de instalação e operação inferiores a (b) para a mesma quantidade produzida. Os processos do tipo (b) produzem uma menor quantidade de resíduos verificando-se a proporção de 1 para 0,01. A metodologia usada é a MEIM e consideram-se como indicadores dos impactes ambientais os definidos na tabela 1.

Os potenciais apresentados traduzem a razão da unidade de massa do poluente tipo sobre o valor da massa do poluente considerado que origina um efeito equivalente no respectivo impacte ambiental.

Para cada localização das entidades transformadoras existem agora duas entidades transformadoras distintas. O número de entidades desta pequena rede é então de 2 produtores de resíduos industriais, 6 transformadores e 3 clientes finais. As matérias-primas e o armazenamento de produtos são considerados

**EXEMPLO NACIONAL DE UMA REDE DE REAPROVEITAMENTO**

Os processos industriais de anodização e lacagem das superfícies de alumínio originam

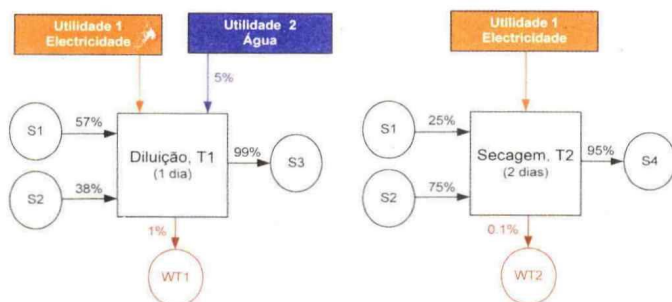


FIGURA 1 - Receitas dos processos de diluição e secagem.

**IMPORTÂNCIA DOS LIMITES AMBIENTAIS NO PROJECTO DAS REDES DE REAPROVEITAMENTO**

Para testar a importância das restrições ambientais no modelo recorre-se a um pequeno exemplo ilustrativo, onde para

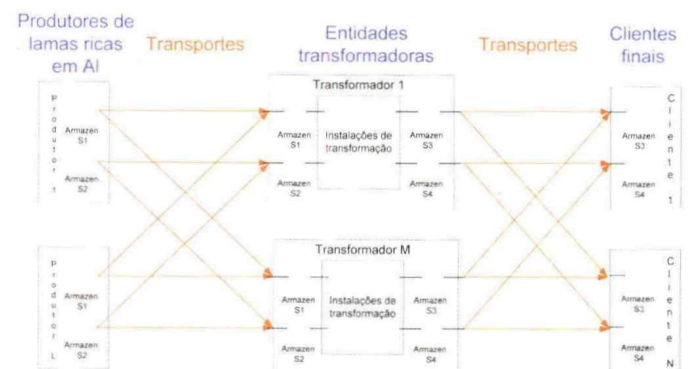


FIGURA 2 - Diagrama da rede de reaproveitamento de lamas ricas em Al.



## GESTÃO DE LAMAS

TABELA 1 - Indicadores de impacte ambiental usados na metodologia MEIM

CTAM (Critical Air Mass, [kg air/h])	$CTAM = \sum_{t=1}^H \left( \frac{\text{Taxa de emissão do poluente no instante } t \text{ (kg de poluente/h)}}{\text{Valor limite standard (kg poluente/kg ar)}} \right)$
CTWM (Critical Water Mass, [kg water/h])	$CTWM = \sum_{t=1}^H \left( \frac{\text{Taxa de emissão do poluente no instante } t \text{ (kg de poluente/h)}}{\text{Valor limite standard (kg poluente/kg água)}} \right)$
SMD (Solid Mass Disposal, [kg/h])	$SMD = \sum_{t=1}^H (\text{kg de resíduos sólidos produzidos no instante } t/h)$
GWI (Global Warming Impact, CO <sub>2</sub> [kg/h])	$GWI = \sum_{t=1}^H [\text{Massa do poluente no instante } t \text{ (kg/h)} \times \text{GWP (kg de CO}_2\text{/kg de poluente)}]$ onde GWP (Global Warming Potential)
POI (Photochemical Oxidation Impact, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> [kg/h])	$POI = \sum_{t=1}^H [\text{Massa do poluente no instante } t \text{ (kg/h)} \times \text{POCP (kg de C}_2\text{H}_4\text{/kg de poluente)}]$ onde POCP (Photochemical Ozone Creation Potential)
SODI (Stratospheric Ozone Depletion Impact [kg/h])	$SODI = \sum_{t=1}^H [\text{Massa do poluente no instante } t \text{ (kg/h)} \times \text{SODP (kg de CFC11/kg de poluente)}]$ onde SODP (Stratospheric Ozone Depletion Potential)

Os potenciais apresentados traduzem a razão da unidade de massa do poluente tipo sobre o valor da massa do poluente considerado que origina um efeito equivalente no respectivo impacte ambiental.

TABELA 2 - Valores dos indicadores de impacte ambiental obtidos por optimização dos casos (1), (2) e (3)

Caso	CTAM [t]	CTWM [kg]	SMD [kg]	GWI [kg]	POI [kg]	SODI [kg]
(1)	0,000E+00	6,370E+01	2,070E+01	2,799E+03	1,188E+03	0,000E+00
(2)	0,000E+00	1,700E+00	0,000E+00	1,346E+03	7,790E-02	0,000E+00
(3)	0,000E+00	1,400E+00	0,000E+00	1,000E+03	5,786E-02	0,000E+00

TABELA 3 - Utilidades consumidas por ciclo para os casos (1), (2) e (3)

Caso	Electricidade [kWh]	Água [m <sup>3</sup> ]	Gasóleo [m <sup>3</sup> ]
(1)	2064,70	5,808	0,494
(2)	0,339	5,756	0,516
(3)	0,240	4,747	0,383

ilimitados. A procura dos clientes finais é caracterizada em termos de três grandezas: procura nominal, máxima e mínima de S3 e S4, respectivamente (200, 230, 170) e (170, 200, 140) toneladas. As capacidades de transformação estão disponíveis para valores contínuos entre 7 e 150 toneladas. Para qualquer valor da capacidade do transformador seleccionado, os factores de ocupação máxima e mínima da capacidade de transformação são respectivamente de 1 e 0,1. Consideram-se dois casos extremos: um primeiro caso (1) em que os limites dos indicadores de impacte ambiental são muito elevados (pouco exigentes) e um segundo caso (2) em que os limites dos indicadores de impacte ambiental são mais restritivos. É ainda considerado um caso adicional, caso (3), com valores limite ainda mais restritivos que

em (2). Os valores limites para os indicadores CTAM/t, CTWM/t, SMD/t, GWI/kg, POI/kg e SODI/kg, são numericamente idênticos entre si e iguais a 7,500E+03, 2,000E+03 e 1,000E+03, respectivamente para os casos (1), (2) e (3).

As soluções optimizadas obtidas pela maximização de um indicador económico conduzem aos valores dos indicadores de impacte ambiental apresentados na tabela 2 (em kg de poluente equivalente), que respeitam os valores limite impostos, bem como ao consumo de utilidades apresentado na tabela 3. Como se pode verificar na figura 3 (produtores = quadrados vermelhos; consumidores = círculos verdes; transformadores (a) e (b) = triângulos azuis), as redes obtidas diferem no tipo de entidades de transformação localizadas em Coimbra: tipo (a)

para uma exigência ambiental baixa e tipo (b) para os restantes dois casos. Diferem ainda nos transportes usados, que embora não apresentados, se revelam indirectamente através do valor do indicador GWI. De notar que o caso (3) apresenta uma configuração idêntica ao



FIGURA 3 - Redes optimizadas para os casos de exigência ambiental baixa (1), alta (2) e excessiva (3)

caso (2) mas, face à acentuação do agravamento das restrições ambientais, a quantidade de produtos S3 e S4 é reduzida de 690 e 600, para 569 e 420 toneladas respectivamente.

Em termos computacionais os três casos têm a mesma dimensão, mas (2) é o que apresenta um maior número de iterações e tempo de execução; o indicador económico é mais elevado em (1), com uma ligeira descida no caso (2) e mais acentuada no caso (3), (367,5E+03 €; 365,5E+03 €; 278,3,5E+03 €, respectivamente), como consequência duma crescente exigência a nível ambiental.

### IMPORTÂNCIA DOS LIMITES AMBIENTAIS COM A METODOLOGIA ECO-INDICATOR 99

Os casos anteriores (1) a (3), quando lhes é aplicada a metodologia eco-indicador 99, em vez da MEIM, apresentam configurações de rede equivalentes às da figura 3 e os valores das emissões de poluentes e de recursos consumidos/poupados apresentados na tabela 4, bem como o consumo de utilidades apresentado na tabela 5. Na tabela 6 os valores da ocupação/transformação de solos não são apresentados, sendo igualmente dispensada a apresentação dos poluentes com valores nulos (os valores negativos correspondem a recursos tornados desnecessários pelo reaproveitamento dos resíduos transformados).

As emissões "poluentes" apresentadas na tabela 4 correspondem aos indicadores de



TABELA 4 - Quantidade de "poluentes" na optimização dos casos (1), (2) e (3) Casos "Poluentes" Unidades (1) (2) (3)

"Poluentes"	Unidades	Casos		
		(1)	(2)	(3)
PAH	[kg]	2,200E+00	2,300E+00	1,700E+00
SPM	[kg]	3,000E-01	1,000E-01	1,000E-01
CO <sub>2</sub>	[kg]	2,799E+03	1,346E+03	1,000E+03
CO	[kg]	1,560E+01	7,700E+00	5,700E+00
SO <sub>2</sub>	[kg]	8,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
NO <sub>x</sub>	[kg]	2,110E+01	1,780E+01	1,330E+01
Al	[t]	-3,392E+00	-3,392E+00	-2,442E+00
Crude	[m <sup>3</sup> ]	6,180E-01	5,160E-01	3,830E-01

PAH – hidrocarbonetos aromáticos policíclicos; SPM – partículas inferiores a 10 micron

TABELA 5 - Utilidades consumidas por ciclo para os casos (1), (2) e (3)

Caso	Electricidade [kWh]	Água [m <sup>3</sup> ]	Gasóleo [m <sup>3</sup> ]
(1)	2,065E+03	5,808E+00	4,944E-01
(2)	3,391E-01	5,756E+00	5,158E-01
(3)	2,403E-01	4,747E+00	3,832E-01

impacte ambiental da tabela 6, os danos da tabela 7 e os valores dos indicadores EI99 apresentados na tabela 8.

Da análise destas tabelas conclui-se que:

- Existe um significativo ganho ambiental para todos os casos apresentados (valor negativo do EI99);
- Os diversos danos gerados pelas redes são "compensados" pelos que seriam gerados na extracção dos re-

ursos minerais equivalentes; O ganho mais significativo verifica-se, como seria de esperar, para o caso (2).

Em termos computacionais os resultados são em tudo comparáveis aos anteriores.

#### OPTIMIZAÇÃO BI-OBJECTIVO

Atendendo a que as soluções apresentadas melhoram signi-

ficativamente os indicadores ambientais à custa duma degradação dos indicadores económicos, justifica-se a necessidade de uma ponderação entre desempenho económico e ambiental, designadamente pelo recurso a optimização do tipo multi-objectivo. Para o efeito recorre-se a uma metodologia "ε-constraint" que começa por definir dois valores objectivo extremos: um valor económico máximo, A, obtido pela maximização do lucro

TABELA 6 - Impactes ambientais na optimização dos casos (1), (2) e (3)

"Poluentes"	Casos		
	(1)	(2)	(3)
EHcancer	2,975E-06	9,977E-07	7,411E-07
EHrespir	1,185E+03	7,776E+02	5,776E+02
EHmudCli	2,799E+03	1,346E+03	1,000E+03
EEacidif	1,380E+00	1,092E+00	8,110E-01
EElocal	8,101E+00	8,101E+00	8,101E+00
EEregion	1,621E+00	1,621E+00	1,621E+00
ERminera	-1,345E+03	-1,345E+03	-9,685E+02
ERfossil	5,267E+02	4,394E+02	3,264E+02

TABELA 7 - Danos originados por ciclo para os casos (1), (2) e (3).

Caso	Saúde Humana [DALY]	Eco Sistema [PAF]	Recursos [MJ]
(1)	2,022E-01	6,080E-03	-5,841E-01
(2)	1,260E-01	5,210E-03	-6,464E-01
(3)	9,357E-02	4,350E-03	-4,581E-01

DALY - (disability-adjusted life year) é uma medida da OMS do transtorno devido a doença; PAF - fracção de espécies potencialmente afectadas pela alteração na qualidade do eco-sistema; MJ - Megá Joule

sem restrições ambientais e um valor ambiental mínimo, J, obtido com a minimização do indicador de dano, EI99, sem restrições económicas. A optimização sucessiva de cada uma destas funções objectivo, com a outra função objectivo tratado como uma restrição progressivamente mais restringida, permite traçar

o gráfico da respectiva frente de Pareto. O exemplo usado, baseado no anteriormente apresentado, considera agora a utilização de duas entidades de transformação em cada um dos 18 distritos do continente, uma com tecnologia mais barata e poluente (com custos de instalação de 55k€) e outra com tecnologia mais moderna, eficiente, limpa e de custo superior (custos de instalação de 70k€). Assume-se que a versão mais ecológica tem maior rendimento no processo de diluição, na proporção de 1 para 0,999, e produz menos resíduos, na proporção de 1 para 0,001, para ambos os processos. A capacidade de transformação instalável varia de forma contínua entre os valores de 7 e 150 toneladas. Consideraram-se ainda 8 produtores de lamas geograficamente distribuídos de acordo com a figura 4 e uma estação de tratamento de efluentes em cada um dos 18 concelhos do continente com procuras nominais proporcionais à população do distrito. A procura tem valores limite superiores e inferiores que são, respectivamente, acrescidos ou diminuídos de 25% do valor nominal. Este valor nominal foi arbitrado para S3 e S4, por distrito, tendo em conta a respectiva população, sendo assim maior nos distritos de Lisboa (330/270 t) e Porto (275/225 t), e menor em Portalegre (20/16 t) e Bragança (23/19 t). A optimização considera um horizonte temporal de produção de 30 dias com operação periódica de 5 dias de 24 horas e os dados ambientais são apresentados na tabela 9.

Num modo de operação em campanha cíclica, com dois tipos de transporte, o modelo é caracterizado por 77318 equações, 61867 variáveis, sendo 31208 delas de decisão do tipo binário (0 ou 1).



INDUSTRIA E AMBIENTE 63

## GESTÃO DE LAMAS

TABELA 8 - Valor do indicador EI99 para os casos (1), (2) e (3)

	(1)	(2)	(3)
EI99 [miliPontos]	-201	-461	-315

EI99 – indicador do dano ambiental na metodologia eco-indicador 99

TABELA 9 - Poluentes emitidos pelo consumo de utilidades

	CO	CO <sub>2</sub>	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	Partículas	HC/NMHC
Diesel [kg/m <sup>3</sup> ]	14,828	2609,5	-	34,6	0,198	4,547
Electricity [kg/kWh]	4.151E-03	7.306E-01	3.872E-03	1.941E-03	1.026E-04	-

TABELA 10 - Comparação das soluções optimizadas nas vertentes económica e ambiental

Caso	maxLucro		minEI99		
	A	G	S	J	
NIter	7419	11519276	10001582	4596	
Tempo para a [s]	Ger.	972.495	988.983	983.306	978.079
	Exec.	20.152	22000.152	21999.580	33.449
Lucro [k€]	953.12 (100%)	935.38 (98%)	935.00 (98%)	703.44 (65%)	
EI99 [mPt]	-1989 (51%)	-2900 (98%)	-2898 (98%)	-2960 (100%)	
Distância relativa da solução	1.84E-02	2.45E-02	2.35E-02	1.66E-02	
Capital Investido [k€]	605.56	632.19	569.01	704.78	
Quantidades produzidas [t]	S3	1892	1884	1892	1431
	S4	1428	1424	1427	1180
Electr. [kWh]	5906	4225	3452	7	
Água [m <sup>3</sup> ]	95.556	94.848	95.428	71.638	
Diesel [kl]	5.310	1.330	1.398	1.479	

\* Os valores em destaque correspondem aos valores-limite impostos.

### RESULTADOS OPTIMIZADOS

A análise multi-objectivo da optimização económica e ambiental (indicador EI99) com a metodologia "e-constraint" conduz à frente de Pareto (ver figura 4), que permite avaliar a ponderação económicoambiental, ou "trade-off".

### ANÁLISE DAS SOLUÇÕES OPTIMIZADAS

Para uma análise mais detalhada dos dados resultantes da optimização escolhem-se quatro soluções da figura 4: duas soluções "equilibradas", G e S, e as soluções não limitadas, A e J. Os respectivos valores são apresentados na tabela 10, enquanto na figura 5 se apresentam as redes optimizadas.

Os factores que mais contribuem para a maximização do lucro, por ordem decrescente de importância, são:

1. Aumento da quantidade de produtos finais,
2. Utilização dos processos de transformação e transporte mais económicos,
3. Centralização da produção usando menos transformadores de maior capacidade, instalados em locais próximos do centro geográfico relativamente aos clientes instalados (reduz os custos de instalação).

De forma similar, os factores que mais contribuem para a minimização do dano ambiental, por ordem decrescente de importância, são:

4. Poupança dos recursos naturais (AI),
5. Produção local (reduz as distâncias dos percursos e a consequente emissão de poluentes),
6. Utilização de processos de transformação mais amigos do ambiente. As soluções

mais equilibradas G e S, conseguem esse equilíbrio recorrendo a:

7. Produção local,
8. Utilização de transportes

mais poluentes para as rotas mais curtas,

9. Instalação de entidades de transformação mais próximas dos produtores de resíduos.
10. Utilização de alguns processos de transformação mais amigos do ambiente.
11. Compensação da instalação de uma entidade de transformação de grande capacidade com o dano evitado dada a poupança do Alumínio enquanto recurso natural.

### CONCLUSÕES

O modelo geral aqui apresentado permite optimizar o projecto e a operação de cadeias de reaproveitamento com avaliação dos correspondentes impactes/danos ambientais. A resolução do do pequeno exemplo apresentado permite verificar a alteração das redes optimizadas face à variação das restrições ambientais, o que indicia fortemente a necessidade de incluir a avaliação dos impactes ambientais logo ao nível do projecto destas cadeias. Esta exigência decorre também do aumento da regulação legislativa europeia nestas matérias, que torna os produtores responsáveis pela retoma dos produtos em fim de vida, dando origem às cadeias de abastecimento em ciclo fechado. O bom acordo entre as metodolo-

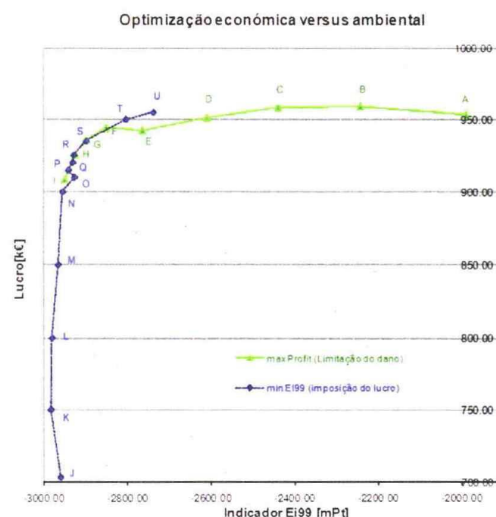


FIGURA 4 - Curvas de ponderação ("trade-off") indicador EI99 versus lucro



gias MEIM e EI99 dos diversos resultados para os diversos casos do exemplo estudado, permitem concluir que se encontrará a mesma classe de soluções independentemente da metodologia de avaliação usada. Assim, o método a usar depende da relação entre o número de parâmetros iniciais a calcular para o modelo e o detalhe ambiental pretendido, ressaltando obviamente os casos de minimização do dano em que só é possível utilizar o EI99. Atendendo a que as soluções melhoram significativamente os indicadores ambientais à custa duma degradação dos indicadores económicos, justificou-se a necessidade de uma ponderação entre desempenho económico e ambiental, designadamente pelo recurso a uma optimização do tipo multi-objectivo. A análise comparativa das diversas soluções obtidas permite ainda identificar que a rede de reaproveitamento privilegia, para

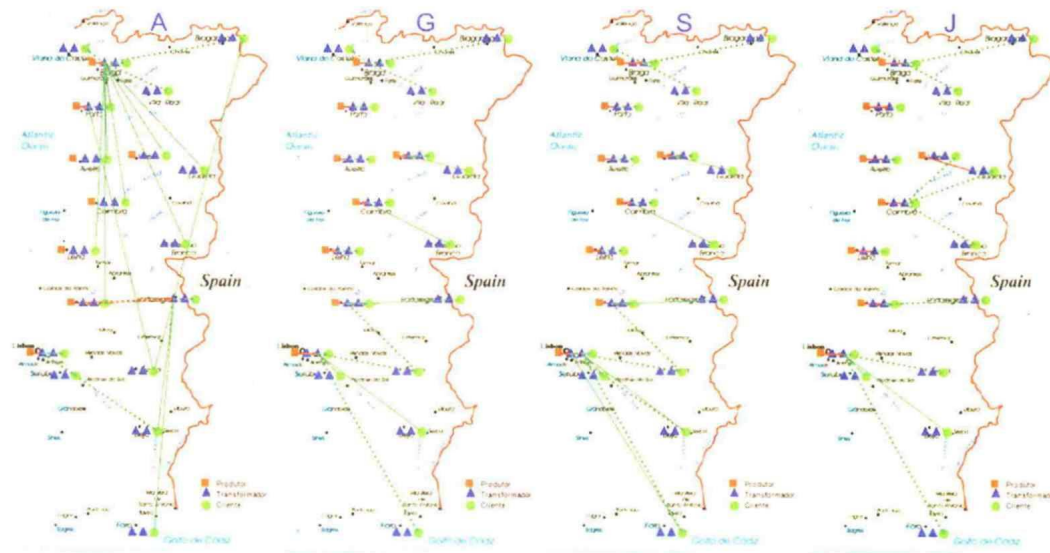


FIGURA 5 - Configuração otimizada da rede para os casos A, G, S e J

as soluções mais equilibradas, a transformação dispersa, um maior número de entidades transformadoras instaladas (a minimização das distâncias percorridas pelos transportes) e a instalação de algumas entidades de transformação "verdes".

**REFERÊNCIAS**

- [1] Pré Consultants B.V. Amersfoort, "The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment", Netherlands, disponível no portal [www.pre.nl](http://www.pre.nl), 2002
- [2] Duque J., "Síntese e optimização de redes de reaproveitamento de produtos residuais", Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2007
- [3] Bartolomeu F., Chambino T., Delmas F., Nogueira C. A., Correia A., Gonçalves L., Gonçalves A., Limpo V., Franco A., Gonçalves R., Figueiredo J. M., Trancoso M. A., Novais A. Q., Barbosa-Póvoa P., Duque J., & Almeida J., "Valorização de lamas com alumínio no tratamento de efluentes industriais e municipais", *Indústria e Ambiente*, 42, 31- , 2006
- [4] Pistikopoulos, E.N.; Stefanis, S.K.; Livingston, A.G., A Methodology for Minimum Environmental Impact Analysis, *AIChE Symposium Series, Volume on Pollution Prevention through Process and Product Modification*, 90, 303, 139-151, 1994.