

METODOLOGIAS VOLTADAS PARA O CÁLCULO DE CUSTOS AMBIENTAIS

Marcelo Rodrigues de Holanda

FAENQUIL - Depto. Básico - Rodovia Itajubá-Lorena, km 74,5 - s/n - 12600-970 - Cx. Postal 116 - Lorena/SP
marcelo@debas.faelquil.br

José Antônio Perrella Balestieri

FEG/UNESP - Depto. de Energia - Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333 - 12516-410 - Guaratinguetá/SP
perrella@feg.unesp.br

Resumo. A geração de energia causa diferentes tipos de impacto ao meio ambiente e à sociedade, dependendo da tecnologia que se emprega para tanto. O termo adotado pela Economia Neoclássica para expressar os danos ambientais e sociais decorrentes desses impactos é a expressão "externalidade", que procura retratar o fato de serem eles externos às transações comerciais. A monetarização das externalidades dá origem aos custos externos, os quais não têm sido incorporados, juntamente com os privados, aos custos da produção. Nos últimos anos, tanto os custos dos danos quanto os da redução das emissões de poluentes vêm sendo calculados e/ou "internalizados" através do emprego de vários métodos de otimização. Este artigo apresenta uma revisão das principais metodologias utilizadas no cálculo de custos ambientais e procura trazer, para algumas delas, exemplos de aplicação.

Palavras chave: metodologias, otimização, custos ambientais, "internalização" de externalidades.

1. Introdução

O desenvolvimento industrial é, quase sempre, acompanhado pela liberação de quantidades substanciais de poluentes atmosféricos. Estes freqüentemente têm, direta ou indiretamente, efeitos nocivos sobre a saúde humana, os animais, os recursos naturais, a biosfera e os materiais de construção (principalmente as estruturas metálicas). Tais impactos causados tanto à sociedade quanto ao meio ambiente, que não têm sido levados em consideração nas análises econômicas de produtores e consumidores de energia, são designados por externalidades ambientais e sociais.

As externalidades relacionadas com a produção de energia são, em geral, definidas como os custos dos danos oriundos da própria geração de energia (ou melhor dizendo, da emissão de poluentes que ela traz). Neste enfoque, faz-se necessário que o desenvolvimento de novos processos industriais seja acompanhado também pelo desenvolvimento de tecnologias adequadas de redução e/ou controle das emissões atmosféricas (Shaban, Elkamel e Gharbi, 1997). É interessante ainda salientar que, muitas vezes, diferentes tipos de tecnologias podem controlar uma dada fonte poluidora, no intuito de alcançar um limite de emissão pré-estabelecido em legislação.

Assim, durante os últimos anos muitos modelos de otimização matemática e termoeconômica têm sido usados para calcular e/ou "internalizar" tanto os custos das externalidades quanto os do controle das emissões. Alguns desses estudos se baseiam na análise de ciclo de vida (*Life Cycle Assessment*), na qual se inclui todos os impactos desde a extração dos materiais para a construção da central geradora de energia até sua disposição final¹ (Azapagic e Clift, 1995; 1999a e 1999b), enquanto outros avaliam somente os impactos relativos ao ciclo de combustível.

A ampla diversidade de modelos demonstra o interesse que o tema tem apresentado na comunidade científica, bem como o impacto que abordagens dessa natureza deverá representar com respeito à sua possível futura implementação, no bojo de legislações ambientais mais restritivas. Este trabalho procura resgatar da literatura alguns destes modelos de otimização com vertente ambiental e os apresenta em suas bases metodológicas, citando, quando possível, seus exemplos de aplicação ao gerenciamento ambiental.

2. As abordagens de otimização com vertente ambiental

No intuito de apresentar o estado do conhecimento atualmente disponível no campo da modelagem ambiental, apresentam-se algumas das principais propostas encontradas na literatura; faz-se menção ao fato de esta revisão não ser exaustiva sobre o tema, mas antes buscar a caracterização de diferentes vertentes de modelagem ambiental.

Bai e Wei (1996) desenvolveram um modelo de programação linear multi-objetivo com o intuito de avaliar-se, numa análise de cenários, as melhores opções para o setor elétrico de Taiwan no sentido de se reduzir ao máximo a quantidade de CO₂ emitida (para o ano 2000) dentro de um custo mínimo; tal estudo, tendo como ano base (a título de

¹ Nas palavras de Azapagic e Clift (1999b), "from cradle to grave" ou do berço à lápide.

comparação dos resultados) o de 1990², calculou para as novas unidades de geração de energia elétrica tanto o custo do controle quanto a eficiência de redução das emissões de CO₂.

As propostas mitigadoras do efeito estufa consideradas nessa análise foram: a substituição de combustíveis, a conservação de energia, a redução da produção no pico, o aumento da eficiência elétrica e a adoção das técnicas de captura e deposição de CO₂; entretanto, os valores das externalidades (na forma de taxas ambientais) e dos padrões de emissão não foram levados em conta pelos autores porque estes elementos, sob os pontos de vista deles, dependem do custo de controle das outras opções.

É importante ainda relatar que, mesmo a geração de energia via hidrelétricas e fontes renováveis (como a solar e a eólica) não emitindo CO₂, seria difícil aumentar drasticamente a porcentagem de geração de eletricidade das próprias fontes renováveis num curto período de tempo; por esta razão, os focos principais da substituição de combustível centraram-se na otimização de novas unidades queimando combustíveis fósseis mesmo e na adoção de uma nova usina nuclear de 2000 MW.

Dessa forma, o modelo proposto tem como objetivos minimizar o custo de instalação das novas centrais elétricas e também as emissões de CO₂ do setor elétrico; logo, pode ser escrito da seguinte maneira:

$$\text{Min } Z_1 = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 C_i N_{ij} \quad (1)$$

$$\text{Min } Z_2 = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 R_i N_{ij} \quad (2)$$

Z_1 ... custo de instalação das novas centrais elétricas

Z_2 ... emissões de CO₂ das novas instalações

C_i ... custo de geração de energia da unidade i

N_{ij} ... geração de eletricidade da nova unidade i designada para a carga j

R_i ... emissão de CO₂ por unidade de geração de energia

$i = 1$ (unidade com queima de carvão)

$i = 2$ (unidade com queima de óleo)

$i = 3$ (unidade com queima de gás natural)

$i = 4$ (usina nuclear de 2000 MW)

$j = 1$ (carga básica)

$j = 2$ (carga média)

$j = 3$ (carga de pico)

As duas funções objetivos acima estão sujeitas à algumas restrições, como segue:

- satisfação da demanda elétrica em 2000:

$$\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 (E_{ij} + N_{ij}) + W = D \quad (3)$$

E_{ij} ... geração de eletricidade da unidade i existente designada para a carga j

W ... percentual de geração hidroelétrica e por fontes renováveis, igual a 10% da geração total de energia nesta análise

D ... demanda de energia elétrica projetada para o ano 2000 em Taiwan - que foi de $14,8 \times 10^{10}$ kWh

- satisfação dos requisitos de carga básica, média e de pico:

$$T \cdot L_b \leq \sum_{i=1}^4 (e_{i1} + n_{i1}) + W_1 \leq T \cdot U_b \quad (4)$$

$$T \cdot L_m \leq \sum_{i=1}^4 (e_{i2} + n_{i2}) + W_2 \leq T \cdot U_m \quad (5)$$

$$T \cdot L_p \leq \sum_{i=1}^4 (e_{i3} + n_{i3}) + W_3 \leq T \cdot U_p \quad (6)$$

$$T = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 (e_{ij} + n_{ij} + W_j) \quad (7)$$

² Isto porque os países membros da OCDE (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico), que também constam do Anexo I do Protocolo de Quioto (MCT, 1999), deveriam fixar suas emissões totais de CO₂ no ano de 2000 para níveis bem próximos dos praticados em 1990.

- T ... capacidade total instalada
- L_b ... limite inferior da razão de geração de carga básica
- U_b ... limite superior da razão de geração de carga básica
- L_m ... limite inferior da razão de geração de carga média
- U_m ... limite superior da razão de geração de carga média
- L_p ... limite inferior da razão de geração de carga de pico
- U_p ... limite superior da razão de geração de carga de pico
- W_j ... capacidade nominal instalada das hidrelétricas e fontes renováveis de energia
- e_{ij} ... capacidade nominal instalada da unidade i existente designada para a carga j
- n_{ij} ... capacidade nominal instalada da nova unidade i designada para a carga j

- satisfação da produção no pico e da margem de reserva:

$$T \geq P \cdot (1 + B) \tag{8}$$

P ... produção no pico

B ... porcentagem da margem de reserva - 20% usada neste estudo

- relação entre a capacidade nominal instalada e a geração de energia:

$$E_i = e_i \cdot h \cdot f_i \tag{9}$$

$$N_i = n_i \cdot h \cdot f_i \tag{10}$$

h ... horas por ano = 8760 horas

f_i ... fator de capacidade da unidade i

- variáveis de decisão não-negativas:

$$N_{ij} \geq 0 ; n_j \geq 0 \tag{11}$$

Os resultados da pesquisa indicaram que a conservação de energia pode significativamente reduzir as emissões de CO_2 quando combinada à redução da produção no pico e ao aumento da eficiência elétrica; foi concluído também (ver Fig. (1)) que o uso das técnicas de remoção de CO_2 pode ser uma opção eficaz e ao mesmo tempo econômica.

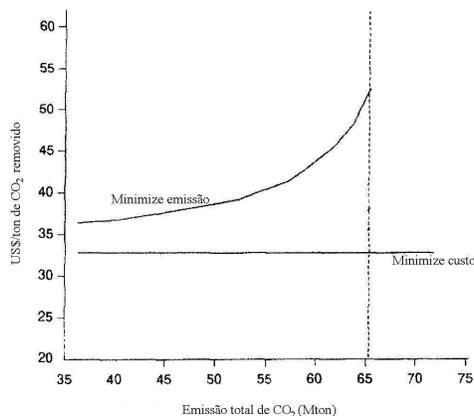


Figura 1. Custo do controle alcançado pelo emprego das tecnologias de remoção de CO_2 no ano 2000.

No artigo de Shaban, Elkamel e Gharbi (1997) é apresentado um modelo de programação linear-inteira para a seleção de tecnologias de controle das emissões atmosféricas. Dado que certa fonte de emissão tem à disposição um conjunto de opções tecnológicas para controle que podem incluir novos equipamentos de controle, *retrofit* de equipamentos de controle e revisão de procedimentos operacionais, cada um com seu custo e eficiência, o objetivo do modelo proposto é buscar o arranjo de equipamentos que reduza as emissões a um limite desejável tal que o custo total do controle (baseado nos custos de investimento e operacional) seja minimizado. Um aspecto bastante importante deste artigo está no fato de se estabelecerem certas condições tecnológicas básicas no funcionamento desses sistemas, e que devem ser consideradas no modelo de modo a torná-lo mais aderente à realidade física: os tempos de disponibilidade em que uma certa tecnologia de controle j está ativa (ou disponível) para atuar sobre uma certa fonte de poluição i .

O modelo é assim estruturado:

$$\text{Mín} \sum_j \left\{ \left(\underbrace{aT_j + b \sum_{i \in K_j} x_{ij}}_{\text{custoI}} + \underbrace{C_j^0 \sum_{i \in K_j} x_{ij}}_{\text{custoII}} \right) + \underbrace{\sum_{i \in K_j} C_{ij} T_{ij}}_{\text{custoIII}} \right\} \quad (12)$$

que corresponde à função objetivo que minimiza os custos totais de poluição. Os termos da Eq. (12) correspondem às seguintes parcelas:

- custo I: representa parte do custo de investimento expresso pelo tempo de uso do sistema de controle, T_j , que é uma variável de decisão;
- custo II: representa o custo de investimento pela instalação, ponderado pela variável inteira x_{ij} , sendo que esta também está associada à mesma variável (desse modo, ambas as parcelas estão associadas, ou seja, ao se instalar certa capacidade paga-se a instalação, um valor fixo, mais o valor variável pela capacidade);
- custo III: representa o custo operacional do emprego do sistema de controle j na fonte i .

T_j ... tempo no qual o sistema de controle j está disponível

x_{ij} ... variável inteira, indica se o sistema de controle j é usado na fonte i ($x_{ij} = 1$) ou não ($x_{ij} = 0$)

K_j ... conjunto de fontes nas quais o dispositivo de controle j pode ser usado

C_j^0 ... custo de instalação do sistema de controle j

C_{ij} ... custo operacional por unidade de tempo quando o sistema de controle j é usado na fonte i

T_{ij} ... espaço de tempo para o qual o sistema de controle j é usado nas fonte i

Os parâmetros a e b são, respectivamente, os coeficientes angular e linear da expressão que traduz o custo I em função de T_j (ver Fig. (2)):

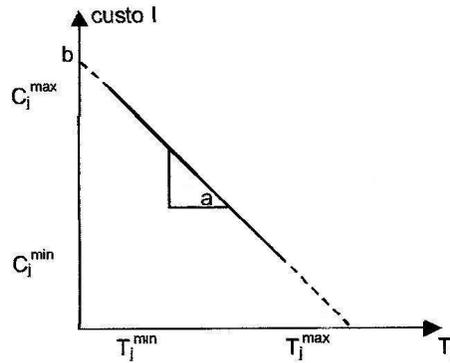


Figura 2. Curva de custo operacional de um sistema de controle.

logo, tem-se que:

$$a = - \left(\frac{C_j^{\max} - C_j^{\min}}{T_j^{\max} - T_j^{\min}} \right) \quad (13)$$

$$b = \frac{T_j^{\max} C_j^{\max} - T_j^{\min} C_j^{\min}}{T_j^{\max} - T_j^{\min}} \quad (14)$$

C_j^{\max} ... custo máximo do sistema de controle j quando o mesmo está disponível pelo seu tempo T_j^{\min}

C_j^{\min} ... custo mínimo do sistema de controle j quando o mesmo está disponível pelo seu tempo T_j^{\max}

T_j^{\max} ... tempo mais tarde de disponibilidade do sistema de controle j

T_j^{\min} ... tempo mais cedo de disponibilidade do sistema de controle j

As restrições do problema de seleção de tecnologias de controle são apresentadas a seguir:

$$x_{ij}(T_j^{\min} - T_i) \leq 0 \quad \forall j, i \in K_j \quad (15)$$

$$\sum_{j \in I_i} x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \quad (16)$$

$$\sum_{i \in K_j} x_{ij} \leq 1 \quad \forall j \quad (17)$$

$$M \sum_{i \in K_j} x_{ij} \geq T_j \quad \forall j \quad (18)$$

$$T_j - x_{ij} T_i \geq 0 \quad \forall j, i \in K_j \quad (19)$$

$$\left(\sum_{i \in K_j} x_{ij} \right) T_j^{\min} \leq T_j \leq \left(\sum_{i \in K_j} x_{ij} \right) T_j^{\max} \quad \forall j \quad (20)$$

$$\begin{cases} L_1 (1 - x_{ij}) \leq T_{ij} - T + T_j \leq U_1 (1 - x_{ij}) \\ L_2 x_{ij} \leq T_{ij} \leq U_2 x_{ij} \end{cases} \quad \forall j, i \in K_j \quad (21)$$

$$\sum_j \left\{ \left(a T_j + b \sum_{i \in K_j} x_{ij} \right) + C_j^0 \sum_{i \in K_j} x_{ij} \right\} \leq B \quad (22)$$

$$\sum_j \sum_{i \in K_j} R_{ijk} T_{ij} \geq K \quad \forall k = 1, 2, \dots, P \quad (23)$$

$$T_{ij} \geq 0 \quad \forall j, i \in K_j \quad (24)$$

$$T_j \geq 0 \quad \forall j \quad (25)$$

$$x_{ij} \in [0, 1] \quad \forall j, i \in K_j \quad (26)$$

T_i ... tempo de partida da fonte i

I_i ... conjunto de opções de controle que podem ser usadas na fonte i

M ... parâmetro cujo valor é representado por um número alto e positivo

T ... espaço de tempo de interesse

B ... orçamento disponível para o desenvolvimento de novos processos de controle

R_{ijk} ... redução total por ano do poluente k da fonte i quando o dispositivo de controle j é usado na própria fonte i

K ... redução total desejada do poluente k

P ... número total de poluentes de fontes diferentes

Tais restrições podem ser descritas por meio dos seguintes comentários, identificados com números iguais aos das equações a que dizem respeito:

(Equação (15)) - para cada sistema de controle j selecionado para atuar na fonte i , o tempo T_i de partida da fonte i deve ser superior ao tempo mais cedo de disponibilidade T_j^{\min} do sistema de controle j ;

(Equação (16)) - para cada fonte i , no máximo um sistema de controle j pode ser utilizado;

(Equação (17)) - cada sistema de controle j pode ser usado no máximo uma vez;

(Equação (18)) - se o sistema de controle j não for selecionado para qualquer fonte i , o tempo T_j no qual o controle j está disponível deve ser igual a zero e o sistema de controle j não pode contribuir para o custo total ($M = T_j^{\max}$);

(Equação (19)) - se o sistema de controle j é selecionado para a fonte i ($x_{ij} = 1$) o tempo disponível do sistema de controle j deve ser maior que o tempo de partida da fonte i ;

(Equação (20)) - para cada sistema de controle j , o tempo disponível T_j está limitado entre um valor mínimo e um máximo, desde que seja selecionado para uso; se não o for, $T_j = 0$;

(Equação (21)) - se o sistema de controle j é usado na fonte i , então $T_j \geq T_i$ e o incremento de tempo em que j é usado para i é $T_{ij} = T - T_j$; se j não é usado para a fonte i , $T_{ij} = 0$. A equação $T_{ij} = (T - T_j)x_{ij}$, não linear, é linearizada para as expressões utilizadas, nas quais:

L_1 - limite inferior de $T_{ij} - T + T_j$;

U_1 - limite superior de $T_{ij} - T + T_j$;

L_2 - limite inferior de T_{ij} ;

U_2 - limite superior de T_{ij} ;

(Equação (22)) - o investimento no desenvolvimento de novos processos de controle não pode exceder a um certo limite imposto B ;

(Equação (23)) - é desejável reduzir uma certa descarga de poluentes a certo nível de redução prescrito K .

No propósito de ilustrar o uso do modelo de otimização apresentado logo acima, os autores consideraram num estudo de caso uma planta real de fabricação de uréia; a Fig. (3), gerada a partir dessa análise, vem mostrar a tendência em se tomar decisões em prol do gerenciamento ambiental com base num modelo de otimização matemática.

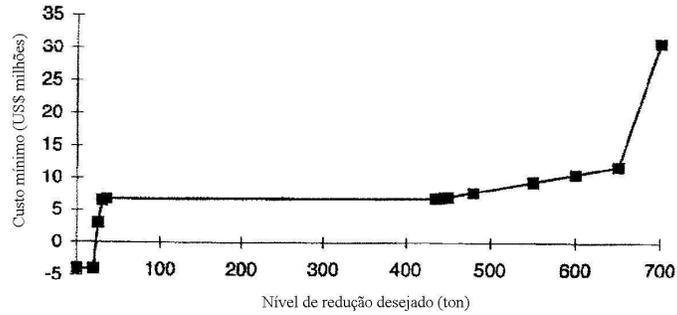


Figura 3. Variação do custo ótimo como uma função do nível de redução de poluição desejado.

O termo “envirônômico”, transliterado para o Português, é uma aberração, dado que deriva de *environment* e econômico, este último aqui empregado mais propriamente no contexto dos aspectos de Termoeconomia; entretanto, o mesmo tem sido empregado com frequência crescente no meio acadêmico. Ainda que careça de uma pesquisa mais aprofundada, muito provavelmente Frangopoulos (1991) tenha sido o precursor desta palavra³.

O modelo termoeconômico ambiental (ou envirônômico) proposto em Frangopoulos (1991) e, posteriormente, melhor organizado em Frangopoulos (1992), é uma extensão da Análise Funcional Termoeconômica (*Thermoeconomic Functional Analysis - TFA*) (Frangopoulos, 1983; 1987 e 1990); nas palavras desse autor: “em adição aos fluxos de energia, exergia (essergia) e custos, fluxos de poluentes entram no plano de ação”. A degradação do meio ambiente pode ser considerada tomando-o por um recurso consumível.

De forma paralela à TFA, o diagrama funcional é também aqui empregado para estabelecer as relações entre as unidades, bem como entre o sistema e o ambiente. Cada poluente p_{rm} emitido pela unidade r é sinalizado por uma linha tracejada com a seta apontando para a própria unidade (ver Fig. (4)), indicando que p_{rm} é uma função do produto (saída) da unidade r e das características técnicas da mesma, além de ser algo que em geral deve ser pago pelo sistema (“internalização” de externalidades). Com exceção da emissão de poluentes, outros impactos ambientais e sociais podem ser representados por p_{rm} 's, se devidamente quantificados.

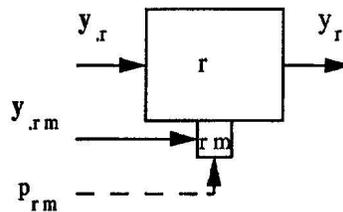


Figura 4. Estrutura TFA ambiental de unidade e tecnologia de controle.

Se um equipamento para a redução (ou mitigação) do m -ésimo poluente liberado pela unidade r é instalado, um elemento rm é imediatamente anexado à unidade. Neste caso, a quantidade inicial p_{rmi} de poluente antes da mitigação, pela operação da tecnologia de controle rm , é reduzida para p_{rm} ; a efetividade do equipamento rm é dada pelo seu grau de redução (*degree of abatement*), expresso por:

$$\delta_{rm} = \frac{p_{rmi} - p_{rm}}{p_{rmi}} \quad (27)$$

δ ... grau de redução
 p ... medida de poluição

A estimativa do termo de poluição (p) pode ser feita tomando-se por referência a exergia, em suas diversas formas, como base; em Frangopoulos (1991 e 1992) encontram-se para a poluição térmica e química as seguintes expressões:

³ Na verdade, em Frangopoulos (1992) este autor traz à si o mérito de haver cunhado tal expressão.

$$p_Q = E_Q = \left(1 - \frac{T_o}{T}\right) Q \quad (28)$$

$$p_{ch} = E_{ch} = \sum_c (\mu_{co} - \mu_c^o) N_c \quad (29)$$

E ... exergia

μ_{co} ... potencial químico da substância c numa mistura no estado estável restrito

μ_c^o ... potencial químico da substância c no ambiente

N_c ... número de mols da substância c numa mistura

Entretanto, apresenta também uma forma mais simples que a abordagem exergética e que permite comparação entre a poluição efetuada e os limites ou padrões estabelecidos de forma mais direta ou conveniente:

$$p = \left(\frac{\alpha - \alpha_o}{\bar{\alpha} - \alpha_o}\right) A \quad (30)$$

α ... propriedade intensiva que caracteriza o poluente

α_o ... propriedade intensiva do mesmo poluente no ambiente

$\bar{\alpha}$... limite de segurança da propriedade intensiva (se excedido o limite, a poluição torna-se perigosa para o ambiente)

A ... quantidade de poluente

Dessa forma, as Eqs. (28) e (29) nessa nova abordagem poderiam ser reescritas como:

$$p_Q = \left(\frac{T - T_o}{\bar{T} - T_o}\right) Q \quad (31)$$

$$p_{ch} = \left(\frac{\chi - \chi_o}{\bar{\chi} - \chi_o}\right) \chi m = \left(\frac{c - c_o}{\bar{c} - c_o}\right) c V \quad (32)$$

T ... temperatura na qual o calor é rejeitado

Q ... quantidade de calor

χ ... conteúdo mássico do poluente no fluxo rejeitado

m ... massa total do fluxo

c ... concentração de poluente no fluxo rejeitado (por exemplo, em g/Nm³)

V ... volume total do fluxo (por exemplo, em Nm³)

$\bar{T}, \bar{\chi}, \bar{c}$... limites de segurança das variáveis T, χ , c, respectivamente

T_o, χ_o, c_o ... valores de T, χ , c no ambiente

Considerações ambientais podem impor limites máximos para os poluentes emitidos:

$$p \leq \hat{p} \quad (33)$$

\hat{p} ... limite máximo de emissão para um determinado poluente do sistema

Ainda com relação à Fig. (4), o termo y_r expressa o produto (ou saída) da unidade r enquanto $y_{,r}$ representa os insumos (ou entradas), assim como $y_{,rm}$ expressa os bens e serviços necessários para a operação do equipamento de controle r_m , obtidos do ambiente e/ou de outras unidades⁴.

A análise do sistema como um todo dá a relação funcional entre cada entrada para uma unidade e suas saídas, também como suas características operacionais e de projeto:

$$y_{0kr} = Y_{0kr}(x_r, z_r, y_r) \quad (34)$$

$$y_{0krm} = Y_{0krm}(x_r, z_r, \delta_{rm}, y_r) \quad (35)$$

$$p_{rm} = P_{rm}(x_r, z_r, \delta_{rm}, y_r) \quad (36)$$

$$y_{r'} = Y_{r'}(x_{r'}, z_{r'}, y_{r'}) \quad (37)$$

⁴ Por exemplo, uma das técnicas de dessulfurização dos gases de escape consome tanto eletricidade, quanto água e calcário.

$$y_{r'm} = Y_{r'm}(x_{r'}, z_{r'}, \delta_{r'm}, y_{r'}) \quad (38)$$

Observe que as letras maiúsculas Y e P simbolizam as funções matemáticas, as quais correlacionam as variáveis entre parênteses com y e p, respectivamente. Dado que uma unidade r pode apresentar conexão com outras unidades r', com tecnologias de controle rm e o ambiente (r=0), pode-se aproximar matematicamente isto por:

$$y_r = \sum_{r'=0}^R \left(y_{r'} + \sum_{m=1}^{M_r} y_{r'm} \right) \quad (39)$$

$y_{0kr}, y_{0krm} \dots$ k-ésimo recurso do ambiente entrando na unidade r ou no elemento de controle rm

x ... conjunto de variáveis independentes de operação

z ... conjunto de variáveis independentes de projeto

$y_{r'}$... função (ou produto) indo da unidade r para a unidade r'

$y_{r'm}$... função indo da unidade r para o m-ésimo elemento de controle da unidade r'

R ... número de unidades e junções num diagrama funcional

M_r ... número de elementos de controle da poluição da unidade r

Cabe, assim, ressaltar que uma forma de abordagem alternativa está em considerar o equipamento de redução rm como uma unidade a parte da fonte geradora de poluentes, devendo-se neste caso tratá-lo como qualquer outra unidade do sistema; essa abordagem é seguida pelo autor em posteriores trabalhos de contribuição (Frangopoulos e Caralis, 1997 e Agazzani, Massardo e Frangopoulos, 1998). A vertente ambiental do modelo funcional termoeconômico apresentada por Agazzani, Massardo e Frangopoulos (1998) analisa e otimiza o projeto de ciclos combinados, em que são estudadas como alternativas a serem empregadas na redução de NO_x a redução seletiva catalítica e a injeção de vapor, bem como são discutidos os efeitos causados pelas penalidades decorrentes da poluição e pelos limites máximos de emissão impostos por regulamentações. E na análise feita em Frangopoulos e Caralis (1997), a formulação termoeconômica ambiental não considera as penalidades como variáveis de decisão, sendo os valores inseridos como parâmetros iniciais de cálculo.

A otimização termoeconômica ambiental (ou environômica) é operada a partir da função objetivo não-linear apresentada na expressão:

$$\text{Min } F = \underbrace{\sum_{r=1}^R \left(Z_r + \sum_{m=1}^{M_r} Z_{rm} \right)}_{\text{custoI}} + \underbrace{\sum_{r=1}^R \left[\sum_{k=1}^{K_r} \left(\int_t \dot{\Gamma}_{0kr} dt \right) + \sum_{m=1}^{M_r} \sum_{k=1}^{K_{rm}} \left(\int_t \dot{\Gamma}_{0krm} dt \right) \right]}_{\text{custoII}} + \underbrace{\sum_{r=1}^R \sum_{m=1}^{M_r} \left(\int_t \dot{\Gamma}_{rm} dt \right)}_{\text{custoIII}} - \underbrace{\sum_{r=1}^R \left(\int_t \dot{\Gamma}_{r0} dt \right)}_{\text{custoIV}} \quad (40)$$

sendo:

- custo I: o custo de investimento do sistema (com representação explícita do equipamento de controle da poluição);
- custo II: a soma dos custos dos recursos consumidos;
- custo III: os custos ambiental e social (custos externos) devido à emissão de poluentes;
- custo IV: os benefícios do sistema derivados de produtos e serviços que são fornecidos ao ambiente.

Z ... custo de investimento

K_r ... número de entradas do ambiente para a unidade r

t ... tempo

$\dot{\Gamma}_{0kr}, \dot{\Gamma}_{0krm} \dots$ custos de y_{0kr} e y_{0krm} , respectivamente

K_{rm} ... número de entradas do ambiente para o m-ésimo elemento de controle da unidade r

$\dot{\Gamma}_{rm}$... custos ambiental e social devido à p_{rm}

$\dot{\Gamma}_{r0}$... benefício (ou renda) da função y_{r0} da unidade r para o ambiente

Todos os custos (incluindo o de investimento) e benefícios podem ser expressos em unidades monetárias ou físicas (isto é, exergia); o período de tempo da integração na Eq. (40) é o de análise: 1 ano, o tempo de vida do sistema, etc. Desse modo, o problema de otimização é especificado pela função objetivo (Eq. (40)) e pelas restrições: igualdades (Eqs. (34-39)) e desigualdades na forma geral $g(x, z, w, t) \leq 0$, as quais podem ser impostas pela operabilidade do sistema, por considerações de segurança, por regulações ambientais, etc. Dentre estas, um limite máximo de emissão imposto à p_{rm} pode ser incluído (ver Eq. (33)). Por fim, vale ainda comentar que em Frangopoulos (1992) o autor traz, num estudo de caso, a aplicação desse modelo environômico a um sistema simples de turbina a gás (compressor,

câmara de combustão e turbina) ao qual se anexa um equipamento de dessulfurização dos gases de escape - resultados numéricos são obtidos e também comentados.

Uma outra metodologia aqui apresentada é bastante representativa das categorias dos modelos termoeconômicos ambientais (ou environômicos), na medida em que sua proposta é apresentar uma base metodológica que evite considerações políticas no estabelecimento de limites de emissão de CO₂, na medida em que se passa a dispor de um método para a alocação dos custos desse poluente. No trabalho de Borchiellini, Massardo e Santarelli (2000), associa-se um custo à exergia destruída no sistema e outro custo à exergia rejeitada ao ambiente por meio dos resíduos do próprio sistema; tais custos podem ser definidos como uma “penalidade por ineficiência”, que representa uma hipótese de taxas impostas não pela emissão dos poluentes mas sim pela operação pouco eficiente do sistema.

De acordo com esses autores, a literatura relata custos para que o CO₂ seja seqüestrado da atmosfera na ordem de 75% dos custos de investimento, ou ainda maiores, além de representarem uma perda de eficiência para o sistema de 3% a 5%, podendo alcançar 10% em alguns casos. O custo para o seqüestro de CO₂ na forma paramétrica segue uma metodologia de base econômico-financeira, representada por:

$$c_{\text{seqCO}_2} = \frac{\text{FI} \cdot \text{PACR}}{t_{\text{CO}_2} \text{ emitida em 1 ano}} \quad (41)$$

c_{seqCO_2} ... custo por tonelada de CO₂ seqüestrado

na qual FI é um índice fracionário (50%, 100% e 150%) da recuperação de capital anual da planta (PACR). A função objetivo do modelo proposto, sujeita às restrições de igualdade ($h_j(x) = 0$) e de desigualdade ($g_k(x) \leq 0$), fica estabelecida pela expressão:

$$\text{Min}_x F(x) = \text{Min}_x \left(\underbrace{\sum_{i=1}^{N_{\text{componentes}}} Z_i(x)}_{\text{custo I}} + \underbrace{c_f G_f(x) \text{LHV}}_{\text{custo II}} + \underbrace{\sum_{a=1}^{N_{\text{redução}}} Z_a(x)}_{\text{custo III}} + \underbrace{\sum_{rc=1}^{N_{\text{recursos}}} \Gamma_{rc}(x)}_{\text{custo IV}} + \underbrace{\sum_{p=1}^{N_{\text{poluentes}}} \Gamma_p(x)}_{\text{custo V}} \right) \quad (42)$$

sendo:

- custo I: o custo de investimento, depreciação e manutenção dos componentes do sistema;
- custo II: o custo dos combustíveis consumidos;
- custo III: o custo de investimento, depreciação e manutenção dos equipamentos de controle da poluição adotados;
- custo IV: o custo dos recursos utilizados pelos equipamentos de controle (água, calcário, amônia, dentre outros);
- custo V: o custo da poluição do ambiente devido à substância p resultante da operação do sistema.

x ... vetor de variáveis de decisão

Z_i ... custo de capital do componente i do sistema

c_f ... custo do combustível

G_f ... vazão mássica do combustível

LHV... poder calorífico inferior do combustível do sistema

Z_a ... custo de capital do equipamento de controle a

Γ_{rc} ... custo dos recursos utilizados pelos equipamentos de controle da poluição

Γ_p ... custo da poluição (custo dos danos) devido à substância p

Observe que a última parcela de custo da Eq. (42) equivale à taxa ambiental, que neste modelo pode ser otimizada; ela representa os custos devidos às ineficiências operacionais e substitui as taxas ambientais normalmente imaginadas para futura atuação sobre a emissão de poluentes. Na forma final para a simulação de estudo de casos, emprega-se a função objetivo descrita do seguinte modo:

$$\text{Min}_x F(x) = \text{Min}_x \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{componentes}}} Z_i(x) + c_f G_f(x) \text{LHV} + \sum_{a=1}^{N_{\text{redução}}} Z_a(x) + \sum_{rc=1}^{N_{\text{recursos}}} \Gamma_{rc}(x) + \right. \\ \left. + I_{\text{CO}_2}^* \cdot \sum_{i=1}^{N_{\text{componentes}}} c_{e_i}(x) [\Psi_e(x) - \Psi_o(x)]_i + I_{\text{CO}_2}^* \cdot \sum_{rs=1}^{N_{\text{resíduos}}} c_{rs}(x) \Psi_{rs}(x) \right) \quad (43)$$

$I_{\text{CO}_2}^*$... índice de emissão de CO₂

c_e ... “penalidade por ineficiência” devida à irreversibilidade produzida pelo componente i

Ψ_e ... exergia do fluxo de entrada

Ψ_o ... exergia do fluxo de saída

c_{rs} ... “penalidade por ineficiência” devida à exergia residual, rejeitada ao ambiente com as emissões de poluentes

Ψ_{rs} ... exergia residual rejeitada pela planta

A proposta termoeconômica ambiental consiste, então, em calcular a taxa de CO₂ emitido relativamente à produção de exergia pelo sistema de geração e o custo da tonelada de CO₂ emitido; para tanto, propõem o seguinte algoritmo:

- 1) calcula-se um ponto operacional ótimo de projeto a partir da função objetivo $F'(x)$;
- 2) os custos exergeticos unitários são obtidos da análise termoeconômica do sistema;
- 3) calcula-se a “penalidade por ineficiência”;
- 4) calcula-se o índice de CO₂ emitido;
- 5) calcula-se a taxa de CO₂;
- 6) calcula-se o custo de CO₂ emitido.

Assim, são empregadas as seguintes expressões desenvolvidas no trabalho em questão, que identificam e definem termos presentes na função objetivo $F'(x)$:

- custo da exergia destruída:

$$c_{e_i} = c_f \cdot \text{UEC} \quad (44)$$

UEC ... custo exergetico unitário⁵

- custo exergetico residual: (na co-geração há mais de um produto e considera-se o maior valor - no caso, a eletricidade)

$$c_{rs} = c_f \cdot \text{UEC}_{\text{produto}} \quad (45)$$

- “penalidade por ineficiência”:

$$EP = 3600 \cdot N_{\text{horas}} \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{componentes}}} c_{e_i} [\Psi_e - \Psi_o]_i + \sum_{rs=1}^{N_{\text{resíduos}}} c_{rs} \Psi_{rs} \right) \quad (46)$$

EP ... penalidade por ineficiência

N_{horas} ... número de horas anuais de operação do sistema (6000 h/ano no artigo)

- índice de CO₂ emitido:

$$I_{\text{CO}_2}^* = \frac{3,67 \cdot [C] \cdot G_f}{G_f \cdot \text{LHV} - \left[\sum_{i=1}^{N_{\text{componentes}}} (\Psi_e - \Psi_o)_i + \sum_{rs=1}^{N_{\text{resíduos}}} \Psi_{rs} \right]} \quad (47)$$

(sendo que $(3,67 \cdot [C])$ vale 3,1 para carvão e 2,75 para gás natural)

$[C]$... porcentagem, em massa, de carbono no combustível

- taxa de CO₂ emitido:

$$\text{taxa}_{\text{CO}_2} = I_{\text{CO}_2}^* \cdot EP \quad (48)$$

taxa_{CO₂} ... encargo econômico imposto às emissões totais de CO₂ da planta

⁵ O custo exergetico unitário é a relação entre o custo exergetico e a exergia de um fluxo $\left(\text{UEC} = \frac{\Psi^*}{\Psi} \right)$.

- custo de CO₂ emitido:

$$c_{\text{tonCO}_2} = \frac{\text{taxa}_{\text{CO}_2}}{G_{\text{CO}_2}} = I_{\text{CO}_2}^* \cdot \frac{EP}{G_{\text{CO}_2}} \quad (49)$$

c_{tonCO_2} ... custo por tonelada de CO₂ emitido

G_{CO_2} ... vazão anual de CO₂ emitido pela planta

É relevante ainda acrescentar a esta revisão outras abordagens com vertente ambiental e que também encontram-se envolvidas com as otimizações termoeconômica e matemática, cuja discriminação ultrapassa o escopo do trabalho ora apresentado (Curti, von Spakovsky e Favrat, 2000a e 2000b; Schöpp et al., 1999; Hsu e Chou, 2000; Altman et al., 1996 e Wang, Jaraiedi e Torries, 1996).

3. Conclusões

Os modelos de programação matemática constituem-se em importante campo do conhecimento para as questões ambientais, em especial aqueles que se ocupam da consideração de múltiplos objetivos, e com isso permitem uma visão menos “mercantilista” dos empreendimentos energéticos ao mesmo tempo em que permitem resgatar uma preocupação cada vez mais crescente dos aspectos ambientais. De igual modo, os modelos termoeconômicos - que em muitas abordagens também fazem uso da otimização matemática - permitem uma série de novas considerações ambientais a partir das vertentes “envirônômicas”, bem como a consideração de externalidades, as quais podem ser ou não assumidas como variáveis de decisão para o projeto energético.

A partir desse conjunto significativo das principais contribuições disponíveis na literatura com relação à modelagem de externalidades, é mister reconhecer que não é possível definir-se vantagens ou desvantagens relativas a cada uma das abordagens, uma vez que há necessariamente diferenças conceituais entre as mesmas, cada qual buscando evidenciar um aspecto peculiar da questão ambiental e tratando a questão da forma mais rigorosa possível. É importante afirmar que quaisquer modelos representam uma “visão pálida” da realidade, um tentativa de aproximação para melhor expressão do conhecimento humano, e portanto cada uma das abordagens é válida no contexto em que é apresentada.

Neste artigo, alguns modelos com vertente ambiental foram resgatados da literatura e apresentados em suas bases metodológicas; a partir dessa revisão, é possível estruturar-se uma formulação que busque identificar as propostas metodológicas mais consistentes - e dessa forma mais adequadas para o tratamento da questão ambiental - de modo a que sejam procedidas averiguações acerca da sensibilidade dos custos ambientais, na forma de taxas e impostos ou por meio de externalidades, nos custos das energias térmica e elétrica produzidas em sistemas térmicos de geração.

4. Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio prestado pela Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), através do processo nº 98/15863-2.

5. Referências

- Agazzani, A., Massardo, A.F., Frangopoulos, C.A., 1998, “Environmental Influence on the Thermoeconomic Optimization of a Combined Plant with NO_x Abatement”, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 120, pp. 557-565.
- Altman, A., Amann, M., Klaassen, G., Ruzczynski, A., Schöpp, W., 1996, “Cost-Effective Sulphur Emission Reduction under Uncertainty”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 90, pp. 395-412.
- Azapagic, A., Clift, R., 1995, “Life Cycle Assessment and Linear Programming - Environmental Optimisation of Product System”, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 19, pp. S229-S234.
- Azapagic, A., Clift, R., 1999a, “The Application of Life Cycle Assessment to Process Optimisation”, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 23, pp. 1509-1526.
- Azapagic, A., Clift, R., 1999b, “Life Cycle Assessment and Multiobjective Optimisation”, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 7, pp. 135-143.
- Bai, H., Wei, J.H., 1996, “The CO₂ Mitigation Options for the Electric Sector: a Case Study of Taiwan”, *Energy Policy*, Vol. 24, pp. 221-228.
- Curti, V., von Spakovsky, M.R., Favrat, D., 2000a, “An Environomic Approach for the Modeling and Optimization of a District Heating Network Based on Centralized and Decentralized Heat Pumps, Cogeneration and/or Gas Furnace. Part I: Methodology”, *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 39, pp. 721-730.

- Curti, V., von Spakovsky, M.R., Favrat, D., 2000b, "An Environomic Approach for the Modeling and Optimization of a District Heating Network Based on Centralized and Decentralized Heat Pumps, Cogeneration and/or Gas Furnace. Part II: Application", Int. J. Therm. Sci., Vol. 39, pp. 731-741.
- Frangopoulos, C.A., 1983, "Thermoeconomic Functional Analysis: a Method for Optimal Design or Improvement of Complex Thermal Systems", Ph.D. Thesis, School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, 242 p.
- Frangopoulos, C.A., 1987, "Thermoeconomic Functional Analysis and Optimization", Energy, Vol. 12, pp. 563-571.
- Frangopoulos, C.A., 1990, "Intelligent Functional Approach: a Method for Analysis and Optimal Synthesis-Design-Operation of Complex Systems", Florence World Energy Research Symposium, Firenze, Italy, pp. 597-609.
- Frangopoulos, C.A., 1991, "Introduction to Environomics", Second Law Analysis - Industrial and Environmental Applications, Vol. 25, pp. 49-54.
- Frangopoulos, C.A., 1992, "An Introduction to Environomic Analysis and Optimization of Energy-Intensive Systems", International Symposium ECOS' 92 on Efficiency, Costs, Optimization and Simulation of Energy Systems, Zaragoza, Espanha, pp. 231-239.
- Frangopoulos, C.A., Caralis, Y.C., 1997, "A Method for Taking into Account Environmental Impacts in the Economic Evaluation of Energy Systems", Energy Conversion & Management, Vol. 38, pp. 1751-1763.
- Hsu, G.J.Y., Chou, F.Y., 2000, "Integrated Planning for Mitigating CO₂ Emissions in Taiwan: a Multi-Objective Programming Approach", Energy Policy, Vol. 28, pp. 519-523.
- MCT, 1999, Protocolo de Quioto [on line], Disponível na Word Wide Web: www.mct.gov.br/clima/quioto/protocol.htm.
- Schöpp, W., Amann, M., Cofala, J., Heyes, C., Klimont, Z., 1999, "Integrated Assessment of European Air Pollution Emission Control Strategies", Environmental Modelling & Software, Vol. 14, pp. 1-9.
- Shaban, H.I., Elkamel, A., Gharbi, R., 1997, "An Optimization Model for Air pollution Control Decision Making, Environmental Modelling & Software, Vol. 12, pp. 51-58.
- Wang, E. J., Jaraiedi, M., Torries, T. F., 1996, "Modelling Long-Run Cost Minimization and Environmental Provisions for Utility Expansion", Energy Economics, Vol. 18, pp. 49-68.

METHODOLOGIES FOR THE CALCULATION OF ENVIRONMENTAL COSTS

Marcelo Rodrigues de Holanda

FAENQUIL - Depto. Básico - Rodovia Itajubá-Lorena, km 74,5 - s/n - 12600-970 - Cx. Postal 116 - Lorena/SP
marcelo@debas.faenquil.br

José Antônio Perrella Balestieri

FEG/UNESP - Depto. de Energia - Av. Dr. Ariberto P. da Cunha, 333 - 12516-410 - Guaratinguetá/SP
perrella@feg.unesp.br

***Abstract.** The energy generation causes different impact types to the environment and to the society, depending on the technology that is using for the accomplishment of this task. The term adopted by the Neoclassical Economy to express the environmental and social damages of those impacts is the expression externalities, which tries to represent that they are external to the commercial transactions. The monetarization of the externalities creates the external costs, which they have not been incorporated together with the private costs, in the costs of the energy production. During the last years, the costs of the damages and the costs of the pollutants emissions reduction have been calculated and/or " internalized " by the employment of several optimization methods. This paper presents a revision of the main methodologies used in the calculation of environmental costs and mentions examples of application for some of them.*

***Keywords:** methodologies, optimization, environmental costs, "internalization" of externalities.*