



SPOLM 2008

ISSN 2175-6295

Rio de Janeiro- Brasil, 05 e 06 de agosto de 2008.

A QUESTÃO DAS COTAS AMBIENTAIS: UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO EMPRESARIAL QUE RESPEITA A CAPACIDADE DE SUPORTE AMBIENTAL

Erito Marques de Souza Filho

COPPE-UFRJ

eritomarkes@yahoo.com.br

Eduardo Pontes Gomes da Silva

Coordenação de Serviços e Comércio – IBGE

eduardopontes@ibge.gov.br

Ronaldo Cerqueira Carvalho

Escola Nacional de Ciências Estatísticas – ENCE

ronel7@ig.com.br

Paulo Gonzaga Mibielli de Carvalho

Escola Nacional de Ciências Estatísticas – ENCE

paulo.mibielli@ibge.gov.br

Nilson Trevisan Torres

COPPE-UFRJ

nilson_trevisan@yahoo.com.br

Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo de minimização de custos empresariais em um sistema de vendas de “Cotas de Poluição”, com o uso da Programação Matemática. Como resultado da modelagem, obtém-se uma política de custos ótima para a empresa, em função da quantidade de cotas de poluição a ser comprada levando-se em consideração a quantidade de multas a serem pagas, uma vez respeitada a capacidade de suporte ambiental, incorporadas no modelo mediante restrições.

Palavras-Chaves: custos empresariais; cotas de poluição; capacidade de suporte;

Abstract

The goal of this work is to present a model of managerial costs that operate in a system of pollution quotes, with the use of Mathematical Programming. As a result, it obtains the great politics for the company, in terms of the quotas quantity the bought being, of reduced pollution and of fines to are paid, where are respected the capacity of environmental support, incorporated in the model by means of restrictions.

Keywords: managerial costs; quotes; environmental support;

1. INTRODUÇÃO

De fato, a distribuição de recursos ambientais disponíveis, bem como a sua utilização, é realizada de maneira excessivamente abusiva, levando-se ainda em consideração que a maioria desses recursos não são renováveis. Estes fatores levam a considerar que vivemos hoje em um cenário favorável aos conflitos ambientais, tema este recorrente nos diversos debates a respeito do mundo atual globalizado.

Relembra-se que em 1997 os países da Organização das Nações Unidas assinaram um acordo que estipulou controle sobre as intervenções humanas no clima, acordo este consubstanciado através do Protocolo de Quioto. Este Protocolo acordou que todos os países desenvolvidos signatários, chamados também de partes do Anexo I, deveriam reduzir suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) em um percentual de 5,2%, em média, relativas ao ano de 1990, no período compreendido entre 2008 e 2012. A fim de não comprometer as economias desses países, o protocolo estabeleceu que parte desta redução de GEE poderia ser realizada através de negociação entre as nações envolvidas através dos mecanismos de flexibilização. As alterações ao Protocolo de Quioto criaram três mecanismos de flexibilização:

- a) Comércio Internacional de Emissões (CIE): mecanismo realizado entre países listados no Anexo I do Protocolo, de maneira que um país que tenha diminuído suas emissões abaixo de sua meta terá a possibilidade de transferir o excesso de suas reduções para outro país que não tenha alcançado tal condição;
- b) Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL): mecanismo que visa atender países que não possuem metas de reduções de emissões de GEE;
- c) Implementação Conjunta (IC) – é a possibilidade da implantação de projetos de redução de emissões de GEEs conjunta entre quaisquer países que apresentam metas a cumprir (Países do Anexo I do Protocolo).

Além da diminuição de emissões de GEE entre 2008 e 2012, os países da União Européia realizaram, em paralelo, um acordo para diminuir emissões no período entre 2002 e 2007. Esses países desenvolveram outras metas alternativas para o período anterior ao Protocolo de Quioto. Neste acordo vislumbra-se a possibilidade de que as permissões de emissões das diferentes indústrias podem ser negociadas diretamente entre elas. Os créditos obtidos a partir de projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) também poderiam ser utilizados para provocar a redução parcial das emissões de poluentes.

Os grupos e setores que não precisavam diminuir suas emissões, à época da assinatura do Protocolo de Quioto, ou empresas localizadas em países não signatários do mesmo (como as empresas americanas, por exemplo), tiveram a alternativa de comercializar suas reduções de emissões nos chamados mercados voluntários. Um exemplo de mercado voluntário é o *Chicago Climate Exchange* (Bolsa do Clima de Chicago). A Europa possui um programa obrigatório de vendas de licenças para poluir que é o *European Union Emissions Trading Scheme*.

O mercado de cotas já existe no Brasil. Recentemente, em 27/09/2007, o Banco holandês *Fortis Bank NV/AS* gastou R\$345 milhões na compra de créditos de carbono colocados à venda pela Prefeitura de São Paulo na Bolsa de Mercadorias e Futuros (BMF) de São Paulo.

Desenvolve-se em nosso país o mecanismo de regulação por incentivos, consumado através da criação da negociação de direitos de emissão. O mecanismo

contempla o desafio colocado à política pública de conseguir o máximo de controle de poluição com um mínimo de custo, independentemente de qual controle de poluição se trate que, embora seja repulsivo à primeira vista, nada mais é do que um sistema que cria e permite a negociação de licenças de poluição.

As permissões negociáveis de emissão foram idealizadas e formuladas inicialmente por Dales (1968) e desenvolvida posteriormente por Tietenberg (1985) e Baumol e Oates (1988). A literatura identifica três tipos de sistemas de permissões (ou certificados) negociáveis de emissão: o *ambient permit system*, que trabalha com base na exposição à poluição no ponto receptor; o *emissions permit system*, que trabalha com base nas fontes de emissão; e o *pollution offset system*, que combina ambos os sistemas.

De uma forma geral, estes sistemas sugerem que os emissores que apresentam os maiores custos de abatimento terão preferência na compra de algum tipo de permissão de emissão ao invés de realizarem o abatimento das emissões, e que os emissores com menores custos poderão preferir o abatimento a comprar algum tipo de permissão, uma vez respeitada a capacidade de suporte, definida como sendo a capacidade máxima de recursos que pode ser extraída do ambiente, sem comprometê-lo. Assim surge um mercado de “certificados de redução de emissões”.

Estabelecido o mercado, os custos totais para se atingir um determinado nível conjunto de emissão será necessariamente menor, porque uma maior parcela do abatimento estará sendo realizada por agentes mais eficientes, com menores custos.

Uma cota de poluição é um dispositivo econômico, onde se determina a quantidade máxima de recurso que a empresa poderia consumir em um dado horizonte de planejamento, respeitada à capacidade de suporte do ambiente. Cada empresa recebe uma quantidade de cotas pré-determinada, de mesmo valor e cujo somatório total deve ser inferior à capacidade de suporte. A empresa que necessitar de um consumo maior do recurso deve adquirir cotas (postas à venda), reduzir sua poluição ou submeter-se ao pagamento de uma multa ambiental.

2. MODELAGEM DO PROBLEMA COM O USO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

Busca-se uma modelagem de minimização de custos para empresas que operam em um sistema de vendas de cotas de poluição. Como resultado do modelo, obtém-se a política ótima para a empresa, em termos da quantidade de cotas a ser comprada, o nível de poluição a ser reduzido e ainda a quantidade de multas que deverão ser pagas.

O modelo aqui proposto esboça a utilização da política de cotas, sobre a ótica empresarial, de maneira que se respeite a capacidade de suporte do ambiente, mediante a inclusão de restrições ambientais nos modelos de Programação Matemática.

Considere R um determinado recurso que se deseja preservar e K a capacidade de suporte ambiental. A partir destes dados são estabelecidas Q cotas que terão validade sob um dado horizonte de planejamento, de tal forma que o valor de K não seja ultrapassado. Estas cotas são posteriormente divididas entre os P consumidores de recursos da região e aqueles que receberem uma quantidade inferior a sua necessidade poderão comprar cotas de outras empresas, e ainda reduzir seu nível de poluição, ou ainda optar por pagar multa em razão do não cumprimento das exigências legais. Caso a empresa venha a optar pelo pagamento de multas, esta também ficará sujeita a uma redução de sua cota no período subsequente.

Neste cenário, para uma dada empresa, o modelo consiste em obter a configuração de menor custo possível que indique a quantidade de cotas de poluição a ser comprada das outras empresas, a sua quantidade de emissões a ser reduzida, e ainda a quantidade de consumo para o qual a empresa estaria disposta a pagar multa.

Os dados de entrada do problema e as variáveis de decisão do problema estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros utilizados no modelo

<i>Parâmetro</i>	<i>Descrição</i>
<i>multa</i>	valor pago por não cumprir as exigências
\lim_{\max}	limite máximo de poluição que a empresa consegue reduzir
<i>neces</i>	necessidade de cota adicional da empresa
cc_i	custo de compra de uma cota da empresa i.
c_r	Custo de reduzir o nível de poluição (proporcionais)
dc_i	oferta de cotas de poluição disponibilizada pela empresa i.
<i>Variáveis de Decisão</i>	<i>Descrição</i>
qc_i	quantidade de cota de poluição a ser comprada da empresa i.
q_r	quantidade de poluição a ser reduzida pela empresa i.
q_d	quantidade de poluição produzida pela empresa, para o qual a empresa decide pagar uma multa ambiental.

A Função Objetivo (FO) consiste na minimização dos custos envolvidos no processo, a saber, custo de compra de cotas de empresas que possuem uma quantidade de cotas superior às suas necessidades, o custo de redução de consumo do recurso e a multa a ser paga.

$$\text{Função Objetivo: Minimizar } cc_i * qc_i + c_r q_r + multa * q_d$$

As restrições do problema são:

Restrição 1: esta restrição indica que a quantidade de cotas comprada de cada empresa (demanda de cotas) deve necessariamente ser menor ou igual a quantidade de cotas que cada empresa pode vender (oferta de cotas). Cada empresa só pode vender as cotas que efetivamente não consumir.

$$qc_i \leq dc_i \quad (1)$$

Restrição 2: esta restrição impõe que a quantidade que a empresa pode reduzir possui um limite máximo de redução devido a restrições tecnológicas ou restrições financeiras.

$$q_r \leq \lim_{\max} \quad (2)$$

Restrição 3: esta restrição estabelece que o somatório da quantidade a ser comprada de cada empresa, da quantidade a ser reduzida e da quantidade de consumo

para o qual a empresa estaria disposta a pagar multa deverá ser igual a necessidade da empresa. É chamada de Restrição de Continuidade.

$$q_d + q_r + \sum_i qc_i = neces \quad (3)$$

Restrição 4: esta restrição implica que a quantidade a ser reduzida deve ser superior a 10% do somatório da quantidade comprada. Este tipo de restrição é chamado de Restrição Regulatória, e faz parte de um conjunto de mecanismos a disposição da autoridade governamental a fim de garantir que as empresas continuem investindo na redução do consumo dos recursos ambientais. Esta restrição procura impedir que esta redução de consumo seja nula. O valor desse percentual deve ser definido nos termos da legislação pela autoridade competente.

$$q_r - 0,1 * \sum_i qc_i \geq 0 \quad (4)$$

Restrições 5, 6 e 7: estas restrições são chamadas Restrições de Não-negatividade e são características dos Problemas de Programação Linear.

$$qc_i \geq 0, q_r \geq 0, q_d \geq 0^1 \quad (5), (6) \text{ e } (7)$$

Os modelos de Programação Matemática aqui apresentados foram aplicados em alguns exemplos, e se mostraram como sendo uma ferramenta de útil para a problemática da política de cotas. Um destes exemplos é apresentado na seção subsequente.

3. ESTUDO DE CASO

Consideremos uma região onde cinco empresas poluem um determinado rio através de poluentes despejados diretamente em seu leito. Deseja-se obter uma configuração ótima para uma destas empresas, de forma que seja respeitada a capacidade limite de suporte de poluentes do rio.

Inicialmente todas as empresas receberam dez cotas, totalizando 50 cotas, que corresponde a capacidade limite de suporte de poluentes do rio. O modelo foi aplicado para a empresa 3 que recebeu 10 cotas, mas que precisa de 14 cotas para operar normalmente em sua capacidade de produção (necessidade de 4 cotas adicionais). A Tabela 2 ilustra a distribuição das cotas e as e a quantidade de cotas disponíveis por empresa.

Tabela 2: Quantidade de cotas requerida e disponível para venda

Empresa	Disponibilidade de cotas		
	Cota	Qtte. requerida	Excesso
1	10	8	2

¹ No modelo de Programação Inteira, aqui desenvolvido, foi acrescentado a restrição integridade das variáveis de decisão do modelo de Programação Linear.

2	10	5	5
3	10	14	0
4	10	12	0
5	10	11	0

Os parâmetros usados no modelo são mostrados na tabela 2.

Tabela 3: Parâmetros utilizados

Parâmetros	
dc1	2
dc2	5
lim max	3
neces	4
cc1	13,5
cc2	14
Cr	19
multa	20

Os resultados obtidos são exibidos na Tabela 4. Eles indicam que a empresa 3 deve comprar 2 cotas da empresa 1, comprar 1,64 cotas da empresa 2 e reduzir sua poluição em 0,36. O custo mínimo obtido foi de 56,81 unidades monetárias.

O baixo valor de redução de poluição obtido se deve ao fato de que os custos de reduzir a emissão de poluentes são elevados, possivelmente pelo fato de demandar um investimento significativo em tecnologia.

Tabela 4: Configuração ideal para a empresa 3

Resultados	
Quantidade a ser comprada da empresa 1	2
Quantidade a ser comprada da empresa 2	1,64
Quantidade a ser reduzida	0,36
Quantidade que a empresa se dispõe a pagar multa	0

Por outro lado, o valor da multa a ser paga em caso de poluição adicional inibe uma política empresarial descompromissada com capacidade limite de suporte de poluentes do rio em questão. Caso o valor da multa fosse 14 teríamos $q_d = 1,8$ e caso o valor da multa fosse 13 o novo teríamos $q_d = 4$, conforme exibido na Tabela 5. Nesse contexto, a multa exerce um papel fundamental na garantia da manutenção da capacidade de suporte.

Tabela 5: Valores de poluição adicional por valor de multa

Multa	Qd	Multa	Qd
13	4	14,8	0
14	1,8	15	0
14,2	1,8	16	0
14,4	1,8	17	0

14,5	0	18	0
14,6	0	19	0
14,7	0	20	0

Em um outro estudo de caso foram consideradas onze empresas emissoras de poluentes na atmosfera. Cada uma delas recebeu uma 5 cotas de poluição, algumas delas podem vender suas cotas sobressalentes, outras devem comprar cotas no mercado para atender suas necessidades, conforme indica a Tabela 6. Aqui optou-se por um modelo de Programação Inteira, na qual não se admitiu a existência de cotas fracionárias.

Tabela 6: Quantidade de cotas requerida e disponível para venda (segundo estudo de caso)

Empresa	Disponibilidade		
	Cota	Qtte requerida	Excesso
1	5	1	4
2	5	2	3
3	5	2	3
4	5	3	2
5	5	15	0
6	5	4	1
7	5	3	2
8	5	9	0
9	5	8	0
10	5	2	3
11	5	1	4

A tabela 7 indica os parâmetros utilizados na segunda modelagem.

Tabela 7: Parâmetros utilizados (segunda modelagem)

Parâmetros			
dc1	4	cc1	7,56
dc2	3	cc2	7,23
dc3	3	cc3	7,12
dc4	2	cc4	7,62
dc6	1	cc6	7,75
dc7	2	cc7	7,19
dc10	3	cc10	7,33
dc11	4	cc11	7,5
lim max	7	cr	8
neces	10	multa	12

Os resultados indicam que empresa 5 deve adquirir cotas apenas das empresas 2, 3, 7 e 10. Além disso, a empresa 5 deve reduzir sua poluição em uma unidade. Em sua configuração ideal a empresa optou por não pagar multa ambiental, em face do valor elevado estipulado pelas autoridades ambientais, o qual coíbe tal prática.

Tabela 4: Configuração ideal para a empresa 3

Resultados

Quantidade a ser comprada da empresa 1	0
Quantidade a ser comprada da empresa 2	3
Quantidade a ser comprada da empresa 3	3
Quantidade a ser comprada da empresa 4	0
Quantidade a ser comprada da empresa 6	0
Quantidade a ser comprada da empresa 7	2
Quantidade a ser comprada da empresa 8	0
Quantidade a ser comprada da empresa 9	0
Quantidade a ser comprada da empresa 10	1
Quantidade a ser comprada da empresa 11	0
Quantidade a ser reduzida	1
Quantidade que a empresa se dispõe a pagar multa	0

Em ambos os modelos, a empresa encontra a melhor política a ser adotada, ante a necessidade de respeitar a capacidade de suporte ambiental. Por outro lado, ela participa de um mecanismo que permite, a priori, a exploração sustentável dos recursos.

4. CONCLUSÕES

A política de cotas tem como elemento central a manutenção da capacidade de suporte, que deve ser conhecida. Em face do fator de incerteza, envolvido na medição da real capacidade de suporte é importante considerar a existência de uma margem de segurança, a fim de mitigar os efeitos ambientais adversos, fruto da complexidade relacionada a este processo de aferição. Para que a restrição ambiental seja efetivamente cumprida, faz-se necessário destacar o papel da multa ambiental, onde se procura coibir seu pagamento mediante cifras de valor elevado.

Para o caso do custo de aquisição de uma cota não ser fixo, as empresas teriam a opção de serem agregadas em um único bloco (uma única empresa), formando uma espécie de consórcio, para adquirirem cotas a preços constantes. Caso isto não ocorra, observa-se uma espécie de “guerra de cotas”, que significa a procura do ótimo individual por parte de cada empresa, onde a soma de soluções individuais não constitui o ótimo do sistema. Esta situação seria semelhante ao Dilema do Prisioneiro da Teoria dos Jogos, onde o fato de cada jogador levar o melhor para si leva a uma situação que não é o melhor para todos.

Uma limitação do modelo consiste na aferição adequada da capacidade de redução de consumo e da estrutura de custos das empresas. Estes parâmetros podem ser de difícil mensuração por parte das empresas e devem ser objetos de estudos meticolosos.

Dentre as sugestões de trabalhos futuros, podemos destacar a implementação do modelo para adequação de níveis de poluição de bacias hidrográficas e emissão de poluentes do ar atmosférico.

Referências Bibliográficas

- [1] ABDON, F. N. "*Comércio Europeu de Cotas de Emissão de Gases de Efeito Estufa: como funcionará e quais são os possíveis impactos para a economia europeia e o meio-ambiente*". São Paulo: Anais do VII Semead - Seminários em Administração FEA-USP, 2004.
- [2] ALVES, A.G. "*Ações poluidoras na bacia do rio guandu e suas conseqüências para ETA Guandu*", 2006.
- [3] CONSTANZA, R. "*Economia Ecológica: Uma agenda de pesquisa*". In May, Peter H. & Motta, Ronaldo S. (orgs). Valorando a Natureza: Análise Econômica para o Desenvolvimento Sustentável. Rio de Janeiro: Ed. Campus, 1994.
- [4] DUARTE, L. C. B. "*Política Externa e Meio Ambiente*". Rio de Janeiro: Zahar Editora, 2003.
- [6] FIANNI, R., "Teoria dos Jogos". Ed. Campus, 2004.
- [5] HILLIER, R. S., LIEBERMANN, G. J., "*Introdução à Pesquisa Operacional*". Ed. Campus, 1990.
- [6] LINS, M. P. E., CALÔBA, G. M. "*Programação Linear com aplicações em teoria de jogos e avaliação de desempenho (Data Envelopment Analysis)*" Rio de Janeiro. Editora Interciência, 2006.
- [7] PEARCE, D. W. & TURNER, R. K. "*Economics of Natural Resources and the Environment*". Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 1990.
- [8] SACHS, I. "*Repensando o crescimento econômico e o progresso social: o papel da política*". In: ABRAMOVAY, R. et al. (Orgs.). Razões e ficções do desenvolvimento. São Paulo: Editora Unesp/Edusp, 2001.
- [9] SOLOW, R. "*Growth Theory: an exposition*". Oxford University Press, 2000 (2ª ed.).
- [10] VEIGA, J. E. "*Desenvolvimento sustentável: o desafio do século XXI*". Rio de Janeiro: Garamond, 2006.