

## **A questão das cotas: otimização empresarial respeitando a capacidade de suporte ambiental**

**Mesa:** a Teoria econômica e meio ambiente: micro e macroeconomia, métodos de valoração.

### **Autores:**

Erito Marques de Souza Filho

Licenciado em matemática pela UFRJ e Mestrando em Estudos Populacionais pela ENCE-IBGE.

[eritomarkes@yahoo.com.br](mailto:eritomarkes@yahoo.com.br)

Rua Francisco Muratori, 5, apt. 405. Santa Teresa. Rio de Janeiro

Tels. 2242-5603 e 9115-7320

Eduardo Pontes Gomes da Silva

Economista da Coordenação de Serviços e Comércio do IBGE

Pós-graduação pelo IBMEC/RJ - MBA em Administração

[eduardopontes@ibge.gov.br](mailto:eduardopontes@ibge.gov.br)

Ronaldo Cerqueira Carvalho

Licenciado em Geografia pela UERJ e Mestrando em Estudos Populacionais pela ENCE-IBGE.

Pós-graduado em Políticas Territoriais no Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

[ronel7@ig.com.br](mailto:ronel7@ig.com.br)

Paulo Gonzaga Mibielli de Carvalho

Doutor em economia pelo IE-UFRJ e Mestre pelo IE-UNICAMP

Professor do mestrado e da especialização da ENCE-IBGE e da graduação da UNESA

[paulo.mibielli@ibge.gov.br](mailto:paulo.mibielli@ibge.gov.br)

## A questão das cotas: otimização empresarial respeitando a capacidade de suporte ambiental

### Introdução

A distribuição dos recursos disponíveis e seu uso, ambos feitos de maneira desigual, juntamente com o fato de muitos desses recursos serem não-renováveis, desenvolve um cenário favorável aos conflitos ambientais, que tem sido um tema recorrente nos diversos debates a respeito do mundo atual globalizado.

Em 1997 os países da Organização das Nações Unidas assinaram um acordo que estipulou controle sobre as intervenções humanas no clima. Este acordo nasceu com a assinatura do Protocolo de Quioto. O Protocolo determinou que países desenvolvidos signatários, chamados também de partes do Anexo I, reduzissem suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) em 5,2%, em média, relativas ao ano de 1990, entre 2008 e 2012. Para não comprometer as economias desses países, o protocolo estabeleceu que parte desta redução de GEE poderia ser feita através de negociação com nações através dos mecanismos de flexibilização.<sup>1</sup>

Além da diminuição de emissões de GEE entre 2008 e 2012, acordado pelo Protocolo de Quioto, os países da União Européia fizeram um acordo para diminuir emissões no período entre 2002 e 2007. Esses países desenvolveram outras metas para o período anterior ao Protocolo de Quioto. As permissões de emissões das diferentes indústrias poderiam ser negociadas entre elas. Créditos obtidos a partir de projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) também poderiam ser usados para diminuir partes das emissões.

Grupos e setores que não precisavam diminuir suas emissões de acordo com o Protocolo de Quioto ou empresas localizadas em países não signatários do Protocolo de Quioto (como as empresas americanas), tiveram a alternativa de comercializar reduções de emissões no chamados mercados voluntários. Um exemplo de mercado voluntário é o *Chicago Climate Exchange* (Bolsa do Clima de Chicago). A Europa tem 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 (27/09/07) o Banco holandês Fortis Bank NV/AS gastou R\$345 milhões na compra de créditos de carbono colocados a venda pela Prefeitura de São Paulo na Bolsa de Mercadorias e Futuros (BMF) de São Paulo.

Desenvolveu-se o mecanismo de regulação por incentivos, que foi a criação da negociação de direitos de emissão. O mecanismo contemplava 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 tratasse, embora repulsivo à primeira vista, um sistema que cria e permite a negociação de licenças de poluição apresentou diversas virtudes.

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.

---

<sup>1</sup> As alterações ao Protocolo de Quioto criaram três mecanismos de flexibilização:

Comércio Internacional de Emissões (CIE) - realizado entre países listados no Anexo I, de maneira que um país, que tenha diminuído suas emissões abaixo de sua meta, transfira o excesso de suas reduções para outro país que não tenha alcançado tal condição;

Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) - realizados em países que não têm metas de reduções de emissões de GEE;

Implementação Conjunta (IC) - implantação de projetos de redução de emissões de GEEs entre países que apresentam metas a cumprir (Países do Anexo I).

De forma geral, esses sistemas sugerem que emissores com maiores custos de abatimento terão preferência por comprar algum tipo de permissão de emissão ao invés de realizarem o abatimento das emissões, e emissores com menores custos irão preferir realizar o abatimento a comprar algum tipo de permissão, respeitando a capacidade de suporte, que é 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, respeitando a 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 a venda), reduzir sua poluição ou submeter-se ao pagamento de uma multa ambiental.

## **Objetivo**

O objetivo desse trabalho é apresentar um modelo de minimização de custos empresariais para empresas, que operam num sistema de vendas de cotas de poluição. Como resultado do uso do modelo, obtém-se a política ótima para a empresa, em termos da quantidade de cotas a ser comprada, de poluição reduzida e de multas a serem pagas.

Esse modelo se diferencia dos tradicionalmente usados em microeconomia por ser de minimização de custos e não de maximização de lucros. Os requisitos tradicionais de modelos de otimização são adotados, a não ser quando explicitamente mencionado em contrário.

## **Metodologia**

A Pesquisa Operacional (PO) pode ser entendida como uma abordagem científica para suporte a tomada de decisão, que traz no seu bojo a construção de modelos matemáticos. Ela se consolidou na 2ª Guerra Mundial, devido à necessidade de adequar as operações executadas por humanos aos novos armamentos desenvolvidos. Com a complexificação das atividades militares, era necessário integrar os diferentes objetivos e necessidades, os quais passariam a ser representados e quantificados através de modelos matemáticos (Lins e Caloba, 2006).

Segundo Goldbarg e Luna (2000) os modelos de PO são estruturados de maneira lógica e amparados no ferramental matemático de representação, tendo por objetivo a determinação das melhores condições de funcionamento dos sistemas por ela representados.

Os principais modelos de PO são denominados de Programação Matemática. Dentre esses podemos destacar a Programação Linear e a Programação Inteira, que serão utilizadas nesse trabalho.

A Programação Linear permite uma descrição matemática do problema que se está modelando e trata da alocação de recursos de maneira otimizada, limitados a atividades em competição (Hillier e Lieberman, 1988). Para tal faz-se uso dos seguintes conceitos (Lins e Caloba, 2006):

a) *Função Objetivo*: descreve as relações que se deseja otimizar, seja maximizando lucros ou minimizando custos.

b) *Variáveis de Decisão*: variáveis relevantes para o problema, passíveis de quantificações.

c) *Restrições*: Elementos restritivos do problema, fruto das limitações associadas à disponibilidade de recursos ou capital para investimento.

Na Programação Linear tanto as restrições como a função objetivo são modelados por funções lineares. Em 1947, George Dantzig desenvolveu o método SIMPLEX, o qual posteriormente veio a se tornar uma poderosa ferramenta para a solução desses tipos de problemas. Os candidatos à solução ótima do problema serão sempre os vértices de um politopo<sup>2</sup>, que é definido pelo conjunto de equações das restrições; o algoritmo percorre tais vértices buscando uma melhor solução a cada iteração. Com o advento de recursos computacionais cada vez mais sofisticados, a Programação Linear e mais geralmente a Pesquisa Operacional passaram a ser um campo de grande importância nos mais diversos setores.

Um problema de Programação Inteira implica no fato de suas variáveis não poderem assumir valores contínuos, ficando condicionada a assumir valores discretos. Esse requisito de que as variáveis sejam inteiras, normalmente, implica em maior complexidade computacional (Goldbarg e Luna, 2000). Um número considerável de algoritmos foi desenvolvido para solução de Problemas de Programação Inteira, entretanto nenhum deles possui eficiência computacional que seja, mesmo remotamente, comparável ao método SIMPLEX<sup>3</sup> (Hillier e Lieberman, 1988).

Os modelos de Programação Matemática aqui utilizados foram testados em exemplos teóricos, resolvidos pelo Solver do Microsoft Excel.

## Desenvolvimento

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.

Seja  $R$  um determinado recurso que se deseja preservar e seja  $K$  a capacidade de suporte ambiental. A partir desses 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.

Essas cotas são 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, ainda reduzir seu nível de poluição ou ainda pagar uma multa por não cumprir as exigências<sup>4</sup>.

Nesse contexto, para uma determinada empresa, o modelo consiste em obter a configuração de menor custo possível, que indique a quantidade a ser comprada de cada empresa, a quantidade a ser reduzida e a quantidade de consumo para o qual a empresa estaria disposta a pagar multa.

Os dados de entrada do problema são:

$multa$  = valor pago por não cumprir as exigências

$lim_{max}$  = limite máximo de poluição que a empresa consegue reduzir

$neces$  = 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  $i$ .

<sup>2</sup> Segundo Maculan e Fampa (2006) define-se um politopo como um conjunto poliédrico convexo limitado. Um conjunto convexo pode ser entendido como aquele onde qualquer combinação linear entre dois pontos do conjunto também pertence ao conjunto.

<sup>3</sup> Exceto para certos tipos especiais de problemas.

<sup>4</sup> Caso opte por pagar a multa, a empresa também fica sujeita, a uma redução de sua cota no período subsequente.

As variáveis de decisão do problema são:

$qc_i$  = 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.

*Função Objetivo:* Minimizar  $cc_i * qc_i + c_r q_r + multa * q_d$

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

As seguintes restrições do problema são especificadas abaixo.

A restrição 1 indica que a quantidade de cotas comprada de cada empresa (demanda de cotas) é 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.

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

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

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

A restrição 3 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. Esta restrição é chamada de restrição de continuidade.

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

A restrição 4 implica que a quantidade a ser reduzida deve ser superior a 10% do somatório da quantidade comprada. Esse tipo de restrição é chamado restrição regulatória e faz parte de um conjunto de mecanismos a disposição da autoridade governamental que visam garantir que as empresas continuem investindo na redução do consumo dos recursos. Essa restrição procura impedir que essa redução seja nula. O valor desse percentual deve ser definido nos termos da legislação, pela autoridade competente.

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

A restrições 5, 6 e 7 são chamadas restrições de não-negatividade e são características dos Problemas de Programação Linear.

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

Os modelos de Programação Matemática aqui desenvolvidos foram testados em alguns exemplos teóricos e se mostraram como uma ferramenta de grande valia a ser mais bem explorada no tocante a problemática da política de cotas. Um destes exemplos é apresentado na seção subsequente.

### **Estudo de Caso: empresas poluidoras de um rio**

Consideremos uma região onde cinco empresas poluem um determinado rio. Deseja-se obter uma configuração ótima para uma dada empresa, de tal forma que seja respeitada a capacidade de suporte de rio.

Inicialmente todas as empresas receberam dez cotas, totalizando 50 cotas, que é a capacidade de suporte do rio. O modelo foi aplicado para a empresa 3 que recebeu 10 cotas mas precisa de 14 (necessidade de 4 cotas adicionais). A Tabela 1 ilustra a distribuição das cotas e as e a quantidade de cotas disponíveis por empresa.

Tabela1: Quantidade de cotas requerida e disponível para venda

| Empresa | Disponibilidade de cotas |                 |         |
|---------|--------------------------|-----------------|---------|
|         | Cota                     | Qtte. requerida | Excesso |
| 1       | 10                       | 8               | 2       |
| 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 2: 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 1. 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 serem elevados, possivelmente demandando investimento significativo em tecnologia.

Tabela 3: 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 de suporte do rio. 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 4. Nesse contexto, a multa exerce um papel fundamental na garantia da manutenção da capacidade de suporte.

Tabela 4: 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  |

## Conclusões

A política de cotas tem como elemento que central a manutenção da capacidade de suporte, que é suposta conhecida. Em face de incerteza, da medição da real capacidade de suporte, é importante a existência de uma margem de segurança, onde se procura mitigar os efeitos ambientais fruto complexidade relacionada a esse 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 de valores 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 isso não ocorra temos uma espécie de “guerra de cotas”, que significa a procura do ótimo individual por parte de cada empresa e nesse caso a soma de soluções individuais não constitui o ótimo do sistema. Essa situação seria semelhante ao Dilema do prisioneiro, na Teoria dos Jogos (Fianni 2004), onde segundo 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. Esses parâmetros podem ser de difícil mensuração por parte das empresas.

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