



ISSN 2175-6295 Rio de Janeiro- Brasil, 12 e 13 de agosto de 2010

## SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL NA INDÚSTRIA DA MINERAÇÃO: UMA APLICAÇÃO DO APOIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO

**Marcelo Gomes Corrêa Macedo**

Cia Vale do Rio Doce – Departamento de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável,  
Av. Graça Aranha 26, Terceiro andar, Centro, 20030-020, Rio de Janeiro, RJ,  
e-mail: marcelo.macedo@vale.com

**Luiz Flávio Autran Monteiro Gomes**

Ibmec/RJ, Av. Presidente Wilson, 118, Centro, 20.030-020, Rio de Janeiro, RJ,  
e-mail: autran@ibmecrj.br

**Luís Alberto Duncan Rangel**

UFF/EEIMVR, Av. dos Trabalhadores, 420, Vila Santa Cecília, 27.255-125, Volta Redonda, RJ  
e-mail: duncan@metal.eeimvr.uff.br

**Resumo:** A avaliação de diferentes alternativas sob múltiplos critérios é uma tarefa essencial em vários setores. Este artigo apresenta uma aplicação da avaliação multicritério, no contexto do desenvolvimento sustentável no setor de mineração e metalurgia. Na maior parte das economias este é um setor que tem enfrentado desafios significativos em termos de sustentabilidade ambiental, na medida em que as operações de mineração têm causado vários impactos importantes sobre o meio ambiente. Este artigo visa avaliar e priorizar os principais atores globais em termos de critérios conflitantes e ambientais, como definidos pela Global Report Initiative, o que se efetua pelo método PROMÉTHÉE II. Uma análise de sensibilidade complementa o estudo, provendo interpretações úteis dos resultados numéricos obtidos. A aplicação do PROMÉTHÉE II permitiu o alcance da meta de se organizar um processo de decisão complexo, auferindo transparência e eficácia da gestão ambiental dos principais atores do setor de mineração.

**Palavras-chaves:** PROMÉTHÉE II - Apoio Multicritério à Decisão - Sustentabilidade Ambiental - Principais Indicadores de Desempenho

**Área de classificação principal do trabalho:** MC - Métodos de Apoio à Decisão Multicritério.

**Abstract:** The evaluation of different alternatives under multiple criteria is a key task in a number of sectors. This article presents an application of multicriteria evaluation, within the context of sustainable development in the sector of mining and metallurgy. In most economies this is a sector that has faced significant challenges in terms of environmental sustainability. Mining operations have indeed caused various important impacts to the environment. This article therefore aims at evaluating and ranking major global players according to environmental, competing criteria as defined by the Global Report Initiative. This is accomplished by the use of the PROMÉTHÉE II method. A sensitivity analysis complements the study by providing useful insights on the numerical results that were obtained. The application of PROMÉTHÉE II allowed reaching the goal of organizing a complex decision process by providing transparency and effectiveness to the environmental management of major global players in the mining sector.

**Keywords:** PROMÉTHÉE II - Multicriteria Decision Aid - Environmental Sustainability - Key Performance Indicators.

**Main area of classification of the paper:** MC – Multicriteria Decision Aiding Methods

## **1. Introdução**

O conceito de desenvolvimento sustentável decorre de um relativamente longo processo histórico de reavaliação crítica existente entre a sociedade civil e seu meio natural. Por se tratar de um processo contínuo e complexo, observa-se ainda hoje uma variedade de abordagens que procura explicar o conceito de sustentabilidade. O termo *desenvolvimento sustentável* foi primeiramente discutido pelo *World Conservation Union*, segundo o qual, para que o desenvolvimento seja sustentável, devem-se considerar aspectos referentes às dimensões social e ecológica, bem como fatores econômicos, dos recursos vivos e não-vivos e as vantagens de curto e longo prazos de ações alternativas. O foco do conceito é a integridade ambiental e, apenas a partir da definição do Relatório Brundtland, a ênfase desloca-se para o elemento humano, gerando um equilíbrio entre as dimensões econômica, ambiental e social (WWF-Brazil, 2009). O GRI, por sua vez, é uma ampla rede de múltiplos *stakeholders* composta por milhares de especialistas de dezenas de países em todo mundo. As diretrizes do GRI são um conjunto de indicadores e recomendações que definem um padrão global de divulgação de informações sobre o desempenho econômico, ambiental e social (GRI, 2009).

Este artigo aborda a utilização de um método do Apoio Multicritério à Decisão na avaliação da sustentabilidade ambiental. Esta avaliação abrange os principais *players* da indústria da mineração e metais, com base nos princípios do *Global Report Initiative* (GRI). A utilização da análise multicritério visa oferecer aos *stakeholders*, notadamente as agências de riscos e fundos de investimento, uma abordagem estruturada do desempenho ambiental do setor de mineração, propiciando com uma avaliação dos riscos associados à sustentabilidade ambiental do setor, e com isso orientar investidores na aplicação de seus recursos em organizações cujos riscos ambientais se encontrem em faixas aceitáveis definidas por essas entidades. Para isto, consideram-se indicadores ambientais específicos e, desta forma, provê-se maior transparência à gestão ambiental desse segmento econômico. A análise de decisão realizada por tal abordagem é uma ferramenta de apoio ao decisor no processo de tomada de decisão, uma vez que permite decompor um problema relativamente grande em um conjunto de situações de menor complexidade. Por sua vez, para o processo de avaliação e tomada de decisão, particularmente em presença de critérios múltiplos, muitas vezes conflitantes, o principal papel da análise é deixar evidente aos envolvidos no processo o entendimento do problema em questão, aqui incluídos todas as variáveis e atores envolvidos (BELTON e STEWART, 2002). Cada critério de avaliação ou de decisão, em particular, é uma ferramenta que permite comparar alternativas de acordo com um ponto de vista particular. O sucesso do processo de apoio à decisão é fortemente dependente da forma de criação da família de critérios. Assim, sob o enfoque multicritério, há necessidade de se construir vários deles representando diferentes pontos de vista, servindo para os avaliadores expressarem suas preferências, as quais devem ser entendidas como parciais, uma vez que se restringem aos aspectos que cada critério particular aborda (BOUYSSOU, 1990).

## **2. Definição do Problema**

### **2.1 O GRI**

O GRI é uma ampla rede *multistakeholder* composta por milhares de especialistas em dezenas de países em todo o mundo. Eles participam dos grupos de trabalho e órgãos de governança do GRI, usam as diretrizes deste em seus relatórios, acessam informações em relatórios baseados nele ou contribuem para o desenvolvimento da sua estrutura de relatórios de outros modos, tanto formal como informalmente (GALLOPIN, 1996). As diretrizes do GRI são um conjunto de indicadores e recomendações que definem um padrão global de divulgação de informações sobre o desempenho econômico, ambiental e social (GRI, 2009).

### **2.2 Desempenho ambiental**

A dimensão ambiental da sustentabilidade se refere aos impactos da organização sobre os sistemas naturais vivos e não-vivos, incluindo os meios bióticos e físicos (solo, ar, água). Os indicadores ambientais abrangem o desempenho relacionado a insumos (como material, energia, água) e a geração (emissões, efluentes, resíduos). Além disso, consideram o desempenho relativo à biodiversidade, à conformidade ambiental e outras informações relevantes tais como gastos com meio ambiente e os impactos de produtos e serviços.

### **2.3 Informações sobre a forma de gestão**

O relatório deve fornecer uma descrição concisa da abordagem de gestão ambiental, com referência aos seguintes aspectos ambientais: matérias; energia; água; biodiversidade; emissões, efluentes e resíduos; produtos e serviços; conformidade; transporte; e aspectos gerais (GRI, 2009).

#### **2.3.1 Indicadores de desempenho ambiental**

Os aspectos contidos no indicador ambiental estão estruturados de forma a refletir os insumos, produções e tipos de impactos que uma organização gera no meio ambiente. Energia, água e materiais representam três tipos básicos de insumos usados pela maioria das organizações. Esses insumos resultam em produções relevantes do ponto de vista ambiental e que são descritos nos aspectos ambientais referentes a emissões, efluentes e resíduos. A biodiversidade também está relacionada ao conceito de insumos, na medida em que pode ser considerada um recurso natural. Entretanto, a biodiversidade também sofre impactos diretos de produções como os poluentes. Os aspectos referentes a transporte, produtos e serviços representam áreas nas quais uma organização também pode impactar negativamente o meio ambiente. Geralmente isto ocorre por meio de terceiros, tais como clientes ou fornecedores de serviços de logística. Conformidade e aspectos gerais, por sua vez, são ações específicas que a organização, seguindo o GRI, adota na gestão do seu desempenho ambiental, como por exemplo: assegurar que os efluentes industriais sejam devidamente tratados antes de serem lançados em cursos d'água ou implantar e manter aspersores de água ao longo das vias internas das minas a fim de evitar a emissão de material particulado.

#### **2.3.2 Aspectos referentes à energia**

Os indicadores de energia cobrem as cinco áreas mais importantes do consumo de energia organizacional e que incluem tanto a energia direta e indireta. O consumo de energia direta é aquela consumida pela organização para a obtenção dos produtos e serviços. O consumo de energia indireta, por sua vez, é toda aquela consumida por outros que servem à organização. As cinco diferentes áreas de consumo de energia às quais estão associados os indicadores são relatadas conforme a seguir: (i) O indicador EN3 refere-se ao consumo de energia direta da organização, considerando a produzida no local; (ii) O indicador EN4 fornece informações referentes ao consumo de energia necessário para a produção de energia comprada externamente; (iii) O indicador EN5 solicita informações sobre a energia economizada devido a melhorias em conservação e eficiência; (iv) O indicador EN6 aborda o desenvolvimento de produtos e serviços com baixo consumo de energia; (v) O indicador EN7 cobre o consumo de energia indireta das atividades da organização.

#### **2.3.3 Aspectos referentes a emissões**

O aspecto referente à emissões, efluentes e resíduos considera indicadores que medem as emissões padrão no meio ambiente e que são consideradas poluentes. Esses indicadores incluem vários tipos de poluentes que são tipicamente contemplados em estruturas regulatórias (EN20 ao EN23 e EN24). Além disso, há indicadores para dois tipos de emissões que são o tema de convenções internacionais: gases causadores do efeito estufa (EN16 e EN17) e substâncias destruidoras da camada de ozônio (EN19). O indicador EN18 aborda as reduções de emissões atingidas e as iniciativas para reduzir tais emissões, de forma qualitativa.

### 3. O Método PROMÉTHÉE II

Segundo Brans e Mareschal (2002), os métodos PROMÉTHÉE pertencem ao campo da Pesquisa Operacional denominado Apoio Multicritério à Decisão (KEENEY & RAIFFA, 1976; ROY, 1985; SAATY, 1980) e destinam-se a resolver problemas multicritério formulados segundo a expressão (4):

$$Max\{f_1(x), f_2(x), \dots, f_j, \dots, f_k(x) | x \in A\} \quad (4),$$

Em (4), tem-se: A – conjunto finito enumerado de n alternativas potenciais;  $f_j(\cdot)$ , para j variando de 1 até k, k critérios que são aplicações de A sobre o conjunto dos números reais. Cada critério pode ter suas unidades próprias e o caso geral considera a possibilidade de critérios a minimizar e critérios a maximizar. Os dados básicos de problemas desse tipo são apresentados como na Tabela 1, a qual compreende n x k avaliações.

Alternativas	Critérios					
	$f_1(\cdot)$	$f_2(\cdot)$	...	$f_j(\cdot)$	...	$f_k(\cdot)$
$a_1$	$f_1(a_1)$	$f_2(a_1)$	...	$f_j(a_1)$	...	$f_k(a_1)$
$a_2$	$f_1(a_2)$	$f_2(a_2)$	...	$f_j(a_2)$	...	$f_k(a_2)$
...	...	...	...	...	...	...
$a_i$	$f_1(a_i)$	$f_2(a_i)$	...	$f_j(a_i)$	...	$f_k(a_i)$
...	...	...	...	...	...	...
$a_n$	$f_1(a_n)$	$f_2(a_n)$	...	$f_j(a_n)$	...	$f_k(a_n)$

Tabela 1 – Avaliação de n alternativas segundo k critérios

Os métodos PROMÉTHÉE têm por objetivo apoiar o decisor na resolução do problema expresso por (4), baseando-se nas seguintes etapas (BRANS & MARESCHAL, 2002):

- Enriquecimento da estrutura de preferência utilizando-se da noção de critérios generalizados, definidos a partir de uma função de preferência, que se encarrega de computar a amplitude dos desvios entre as avaliações feitas sob cada critério. É essencial que esta etapa seja compreendida de maneira clara pelo decisor, considerando-se que todos os parâmetros definidos têm usualmente um significado econômico, social ou físico. A maneira como as funções de preferências são montadas permite eliminar todos os efeitos de escalas diferentes ligadas a cada critério. São propostos seis tipos de critérios generalizados. Embora até agora nas aplicações feitas tais critérios venham atendendo todas as questões do mundo real, não existem objeções de se considerar outros tipos;

- Enriquecimento da relação de dominância, onde se busca encontrar uma relação de superação que leva em conta o conjunto dos critérios propostos. Para cada par de alternativas se estabelece um grau geral de preferência de uma sobre outra. O apoio à decisão proporcionado pelos métodos PROMÉTHÉE consiste na análise da relação de superação, com o objetivo de esclarecer o decisor. Diferentes versões dos métodos PROMÉTHÉE destinam-se a abordar problemáticas distintas e produzem resultados conformes com as mesmas, tais como: PROMÉTHÉE I: pré-ordem parcial, problemática de escolha; PROMÉTHÉE II: pré-ordem completa, problemática de ordenação; PROMÉTHÉE III: pré-ordem completa, com amplificação da noção de indiferença; PROMÉTHÉE IV: pré-ordem completa ou parcial, conjunto contínuo de soluções; PROMÉTHÉE V: pré-ordem completa, com restrições de segmentos; PROMÉTHÉE VI: pré-ordem completa ou parcial, graus de dificuldades em pesos (BRANS & MARESCHAL, 2002; MORAIS & ALMEIDA, 2006).

Levando-se em conta um critério particular qualquer j, pode-se associar às ações entre dois pares quaisquer a e b através de uma relação de dominância natural (I, P), I significando indiferença e P significando preferência, como se pode ver na expressão (5).

$$\forall a, b \in A: \begin{cases} f_j(a) > f_j(b) \Leftrightarrow aP_j b \\ f_j(a) = f_j(b) \Leftrightarrow aI_j b \end{cases} \quad (5)$$

Fazendo-se  $d_j(a, b) = f_j(a) - f_j(b)$ , pode-se considerar a relação de dominância muito pobre e até errônea para o decisor, uma vez que ela só se ocupa do sinal positivo ou negativo, não levando em conta sua amplitude. Para dar mais consistência à relação de dominância, cria-se uma função  $P_j$ , cujo objetivo é determinar o grau de preferência da ação  $a$  em relação à ação  $b$  em função de  $d_j(a, b)$ . Apresenta-se esta função na equação 6.

$$P_j(a, b) = P_j[d_j(a, b)] \quad (6)$$

Partindo-se da premissa de que se normaliza o grau de preferência seja normalizado tal que  $0 \leq P_j(a, b) \leq 1$ , definem-se as preferências da seguinte forma:  $P_j(a, b) = 0$  se  $d_j(a, b) \leq 0 \rightarrow$  Sem preferência;  $P_j(a, b) \approx 0$  se  $d_j(a, b) > 0 \rightarrow$  Preferência fraca;  $P_j(a, b) \approx 1$  se  $d_j(a, b) \gg 0 \rightarrow$  Preferência forte;  $P_j(a, b) = 1$  se  $d_j(a, b) \gg \gg 0 \rightarrow$  Preferência estrita. Os graus de preferências são números reais absolutos. A dupla  $\{f_j(\cdot), P_j(\cdot, \cdot)\}$  é denominada critério generalizado. Trata-se de um critério de avaliação realizado para sua função de preferência. Observa-se que, quando  $d_j(a, b) \leq 0$ ,  $P_j(a, b) = 0$ , isto não significa que  $P_j(b, a)$  não possa ser positivo. A Figura 1 apresenta os seis tipos de funções de preferência empregadas no método PROMETHEE II (BRANS & MARESCHAL, 2002).

Tipo	Representação gráfica	Fórmula	Descrição da preferência do decisor
I Usual		$H_j(d_j) = \begin{cases} 0 & d_j \leq 0 \\ 1 & d_j > 0 \end{cases}$	Não há indiferença entre $a$ e $b$ a menos que $f_j(a) = f_j(b)$ . Desde que haja uma diferença existe uma preferência estrita pela ação cuja avaliação é mais elevada. No critério do tipo I, o decisor não fixa nenhum parâmetro.
II Quase - critério		$H_j(d_j) = \begin{cases} 0 &  d_j  \leq q_j \\ 1 &  d_j  > q_j \end{cases}$	As ações são indiferentes desde que o desvio não ultrapasse o limite de indiferença $q_j$ . A partir daí, registra-se uma preferência estrita pela ação de maior valor absoluto.
III Linear		$H_j(d_j) = \begin{cases} \frac{ d_j }{p_j} &  d_j  \leq p_j \\ 1 &  d_j  > p_j \end{cases}$	Esse critério permite que o decisor admita que sua preferência por uma ação vá crescendo linearmente até um limite $p_j$ , a partir do qual a preferência é estrita. Normalmente o parâmetro $p_j$ é estabelecido de cima para baixo.
IV Estágios		$H_j(d_j) = \begin{cases} 0 & \text{se }  d_j  \leq q_j \\ \frac{1}{2} & \text{se } q_j <  d_j  \leq p_j \\ 1 & \text{se }  d_j  > p_j \end{cases}$	Nesse critério, enquanto a diferença não ultrapassa $q_j$ , $a$ e $b$ são indiferentes. Entre $q_j$ e $p_j$ , o grau de preferência é fraco (1/2). A partir de $p_j$ a preferência é estrita. Muito usado para caracterizar as avaliações qualitativas.
V Linear / indiferença		$H_j(d_j) = \begin{cases} 0 & \text{se }  d_j  \leq q_j \\ \frac{ d_j  - q_j}{p_j - q_j} & \text{se } q_j <  d_j  \leq p_j \\ 1 & \text{se }  d_j  > p_j \end{cases}$	Nesse critério, enquanto a diferença não ultrapassa $q_j$ , $a$ e $b$ são indiferentes. Além desse limite, o grau de preferência cresce linearmente com $d_j$ , até atingir $p_j$ onde uma preferência estrita se estabelece.
VI Gaussiano		$H_j(d_j) = 1 - e^{-\frac{d_j^2}{2s_j^2}}$	Nesse critério, o grau de preferência cresce de forma contínua com $d_j$ . Somente o parâmetro $s_j$ é fixado.

Figura 1 – Funções de preferência do método PROMÉTHÉE II. Fonte: Brans & Mareschal, 2002

O critério generalizado desempenha um papel muito importante, pois permite ao decisor atenuar ou amplificar o efeito do critério sobre o processo de decisão. Deve-se entender a escolha das funções de preferência como um grau de liberdade do analista de decisão em relação à valoração das diversas alternativas em relação a um determinado critério. Entretanto, como mostram Brans & Mareschal (2002), tal flexibilidade é muitas vezes percebida mais como uma dificuldade, o que leva os analistas a optarem por métodos mais rígidos. Assim, é importante que se estabeleçam diretrizes para utilização dos critérios. É necessário frisar que o decisor dispõe de graus de liberdade com relação ao tipo de critério a ser usado e aos limites de indiferença e preferência estrita. Como característica do método PROMÉTHÉE II, necessita-se associar as preferências aos desvios entre as avaliações e não aos valores absolutos das mesmas (BRANS & MARESCHAL, 2002).

Partindo-se da Figura 1, escolhe-se normalmente o tipo I em situações radicais nas quais um mínimo desvio justifica a preferência estrita. Os tipos II e IV são particularmente adequados para casos de dados qualitativos em uma escala discreta. Recomenda-se selecionar os tipos III ou V no caso de avaliações ao longo de uma escala contínua, com ou sem zona de indiferença. Prefere-se o tipo VI é preferido quando o decisor considera um grau de preferência positivo para desvios fracos, crescendo tal grau à medida que o desvio se torna maior. Os limites de indiferença  $q$  e o de preferência estritos  $p$ , uma vez definido o critério, passam a ter um claro significado para o decisor, que pode fixar sua tolerância em relação a esses desvios.

Definidas as funções constantes na Figura 1, obtém-se em seguida a matriz de avaliação de todas as alternativas com relação aos critérios, como apresentado em (7).

$$\forall_j, \forall a, b \in A: f_j(a), f_j(b) \rightarrow \{f_j(a), f_j(b), P_j(a, b)\} \quad (7)$$

Considerando-se  $w_j > 0$ ,  $j = 1, 2, 3, \dots, k$ , cada peso  $w_j$  representando a importância relativa do critério  $j$ , chega-se a fórmula (8), sendo que o conjunto dos pesos dos critérios normalizados obedece a equação (9).

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b) \cdot w_j \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^k w_j = 1 \quad (9)$$

O estabelecimento dos pesos  $w_j$  é de grande relevância. Sugere-se que o decisor adote como ponto de partida um método de vetor próprio de comparações par a par como no método AHP (SAATY, 1994), ou, na ausência de prioridades claramente definidas, uma distribuição equitativa; partindo-se deste ponto, fixam-se progressivamente os pesos por meio de uma análise de sensibilidade. Os métodos PROMÉTHÉE apresentam essa característica interativa até aqui descrita e a análise visual proporcionada pelo *software* GAIA igualmente desempenha um papel importante nessa interatividade (BRANS & MARESCHAL, 2002). Trabalha-se então com três fluxos de superação:

- Fluxo de saída, obtido pela equação (10):  $\phi^+(a) = \sum_{x \in A} \pi(a, x) / (n-1)$  (10)

onde  $a$  supera as  $(n-1)$  ações. Este procedimento representa a força de  $a$ .

- Fluxo de entrada, obtido pela equação (11): 
$$\phi^-(a) = \sum_{x \in A} \pi(x, a) / (n-1) \quad (11)$$

onde  $a$  é superada pelas  $(n-1)$  ações. Este procedimento representa a fraqueza de  $a$ .

- Fluxo líquido, obtido pela equação (12): 
$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad (12)$$

que exprime o balanço do fluxo de entrada e de saída da ação  $a$ .

O valor global obtido por cada alternativa através do cálculo de seu fluxo líquido irá determinar a ordenação desta alternativa em relação às demais. Quanto maior o valor global de uma alternativa melhor será a sua colocação em relação às demais.

## 4. Estudo de Caso

### 4.1 Escolha do método

A dificuldade na tomada de decisão para a classificação das empresas no que diz respeito aos seus desempenhos ambientais, por meio dos indicadores GRI, impõem naturalmente a utilização de análise multicritério, na medida em que consideram diferentes atributos e aspectos subjetivos, tais como: iniciativas para fornecer produtos e serviços com baixo consumo de energia; descrição dos impactos significativos na biodiversidade de atividades; produtos e serviços em áreas protegidas; estratégias, medidas em vigor e planos futuros para gestão de impactos na biodiversidade, dentre outros.

A escolha do método multicritério a ser empregado, no entanto, depende do tipo de problema em análise, do contexto estudado, dos atores envolvidos, da estrutura de preferências e do tipo de resposta que se deseja alcançar, ou seja, da problemática de referência (GOMES, GOMES & ALMEIDA, 2009). O problema abordado neste estudo de caso, em particular, visa uma classificação e ordenação de alternativas, considerando os principais players globais de mineração, sofrendo a influência de vários indicadores de desempenho ambiental, segundo padrão GRI. As empresas selecionadas compreendem as que são estimadas como tendo valor de mercado superior a US\$ 10 bilhões e que publicaram os seus relatórios de sustentabilidade em 2006. Desta forma, as empresas selecionadas foram: BHP Biliton, Vale, Anglo American, Rio Tinto e Xstrata, todas elas sociedades anônimas com ações negociadas em bolsas de valores dos Estados Unidos ou Reino Unido. Cada um dos indicadores ambientais será considerado como um critério de avaliação e, portanto, demandará uma informação inter-critério que corresponda à sua importância relativa no contexto da sustentabilidade ambiental. Para estes casos, recomenda-se em especial o uso dos métodos da Escola Francesa que utilizam a abordagem calcada no já mencionado conceito de relação de superação (ROY & BOUYSSOU, 1993; GOMES, 2007).

Dentre os métodos baseados na relação de superação desenvolvidos para selecionar, ordenar e classificar os indicadores de desempenho ambiental dos principais players da indústria da mineração, considerando as premissas do GRI, decidiu-se pela família de métodos multicritério PROMÉTHÉE, uma vez que o problema requer a ordenação das alternativas (empresas) considerando indicadores ambientais de sustentabilidade. Assim, o método escolhido foi o PROMÉTHÉE II, por sua vantagem em requerer uma informação adicional muito clara, que pode ser facilmente obtida e gerenciada tanto pelo decisor como pelo analista. Introduce-se esta informação adicional, a já citada noção de critério generalizado, com a finalidade de captar a amplitude das diferenças entre as avaliações de cada um dos critérios, enriquecendo a estrutura de preferência. Além do mais, o PROMÉTHÉE II é um método multicritério flexível, oferecendo dois graus de liberdade ao decisor: o primeiro é relativo à seleção do tipo de função de preferência e, o segundo, à seleção dos limites a definir. (BRANS & MARESCHAL, 2002).

Observe-se que a escolha do PROMÉTHÉE II, como outros métodos da Escola Francesa, pautou-se pelo o fato de que aquele método exige uma intensa interação entre os decisores e o analista, a fim de tornar clara a parametrização utilizada. Além disto, os parâmetros do modelo devem representar o consenso do grupo por unanimidade ou ao menos a expressão de uma maioria significativa (LEYVA-LÓPEZ & FERNANDÉZ-GONZALEZ, 2003).

O método PROMÉTHÉE II propicia a definição de graus de preferência representados por um número real, e que varia entre 0 (indiferença) e 1 (preferência forte). Neste estudo de caso isto significa: a) comparar os indicadores de desempenho ambiental das principais indústrias mundiais de mineração considerando as vantagens de um sobre o outro e sem negligenciar as características comuns entre eles; b) que os critérios para a definição dos indicadores de desempenho ambiental e as alternativas para cada um deles não são claramente definidos; e c) que os critérios e as alternativas estão interligados, de modo que um determinado indicador pode refletir parcialmente outro.

#### 4.2 Análise dos dados

Esta fase compreendeu a análise dos dados obtidos a partir dos relatórios de sustentabilidade das empresas de mineração pelo software Decision Lab (VISUAL DECISION, 2009), a fim de se obter os resultados de cálculos segundo o método PROMÉTHÉE II. Nessa etapa procedeu-se a uma análise de sensibilidade quanto aos pesos utilizados. Para fins da pesquisa selecionaram-se os indicadores de desempenho ambiental mais representativos do ponto de vista da sustentabilidade ambiental, voltados ao segmento da mineração. Apresentam-se os indicadores selecionados na Tabela 2. Informações mais detalhadas sobre a análise dos dados realizada pode ser encontrada em Macedo, Gomes & Rangel (2009).

Forma de Gestão	Indicador	Descrição
Matérias	EN1	Materiais usados por peso ou volume
Energia	EN3	Consumo de energia direta discriminada por fonte de energia primária
	EN4	Consumo de energia indireta discriminada por fonte primária
Água	EN8	Total de água retirada por fonte
	EN10	% e volume total de água reciclada ou reutilizada
Biodiversidade	EN11	Localização e tamanho da área possuída, arrendada ou administrada dentro de áreas protegidas, ou adjacentes a elas, e áreas de alto ind. de biodiversidade fora das áreas protegidas.
	EN13	Habitats protegidos ou restaurados
Emissões, efluentes e resíduos	EN16	Total de emissões diretas e indiretas de gases causadores do efeito estufa
	EN20	NOx, SOx e outras emissões significativas por tipo e peso
	EN21	Descarte total de água, por quantidade e destinação
	EN22	Peso total de resíduos, por tipo e método de disposição.
Conformidade	EN28	Valor monetário de multas significativas e número total de sanções não monetárias resultantes de não conformidades com leis e regulamentos ambientais

Tabela 2 – Indicadores de Desempenho Ambiental escolhidos

A Tabela 3 apresenta os dados das empresas pesquisadas, obtidos a partir do relatório de sustentabilidade 2006 com os respectivos pesos. Os indicadores ambientais associados ao consumo de água (EN8), recirculação de água (EN10) e tamanho de áreas impactadas (EN 11) receberam os maiores pesos na medida em que são os mais significativos em termos ambientais para a indústria da mineração.

Indicador	Anglo Gold	BHP	Vale	Rio Tinto	Xstrata	Peso
EN1 - t	12061000	4186100	0	0	0	2,5
EN3 - peta joules	300	304	0	258	25,5	5,0
EN4 - peta joules	0	0	0	0	37,7	5,0



EN8 – m3	582000	204250000	140000000	391000	85600000	20,0
EN10 – m3	0	170000000	114800000	0	101300000	20,0
EN11 - ha	8000	0	0	350	8829	15,0
EN13 - ha	0	2400	400	401	992	15,0
EN16 -t	36447000	51000000	0	28300000	0	5,0
EN20 - t	136000	259850	0	0	252888	2,5
EN21 – m3	208328000	88180000	0	0	7258000	2,5
EN22 – t	278913	202530	0	2192000	957600000	2,5
EN28 – US\$	0	141526	0	56800	8100	5,0

Tabela 3 – Valores e pesos dos indicadores de desempenho ambiental escolhidos

## 4.3 Resultados

### 4.3.1 Análise dos dados pelo DECISION LAB

A Figura 2 apresenta uma tela do *software* Decision Lab empregado na implementação deste estudo de caso.

	EN8	EN3	EN4	EN8	EN10	EN11	EN13	EN16	EN20	EN21	EN22	EN28
Unit	tonelada	peta joules	peta joules	metro cúbico	metro cúbico	hectare	hectare	tonelada	tonelada	metro cúbico	tonelada	dólar
Anglo Gold	12061000.00	300.00	0.00	582000.00	0.00	8000.00	0.00	36447000.00	136000.00	208328000.00	278913.00	0.00
BHP	4186100.00	304.00	0.00	204250000.00	170000000.00	0.00	2400.00	51000000.00	259850.00	88180000.00	202530.00	141526.00
Vale	0.00	0.00	0.00	140000000.00	114800000.00	0.00	400.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Rio Tinto	0.00	258.00	0.00	391000.00	0.00	350.00	401.00	28300000.00	0.00	0.00	2192000.00	56800.00
Xstrata	0.00	25.00	37.00	85600000.00	101300000.00	8829.00	992.00	0.00	252888.00	7528000.00	957600000.00	8100.00

Figura 2 – Classificação das empresas

Com o comando *View*, opção *Rankings*, obtém-se a classificação total mostrada na Figura 3.

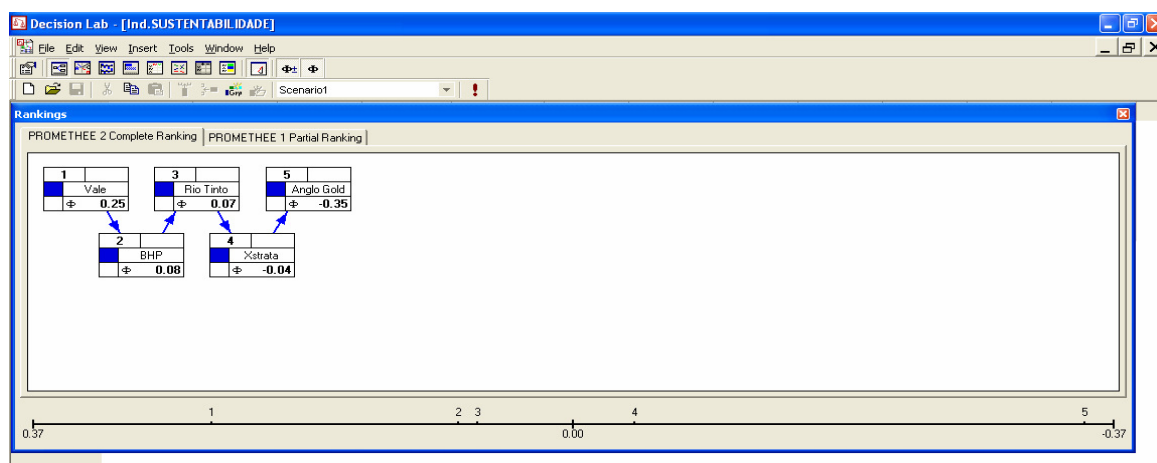


Figura 3 – Classificação das empresas

### 4.3.2 Análise de sensibilidade do PROMÉTHÉE II

Fez-se a análise de sensibilidade dos resultados do PROMÉTHÉE II em relação à variação de pesos, com a finalidade de se avaliar as alterações de resultados em função de flutuações nos valores dos mesmos. Escolheram-se, em relação aos pesos dos critérios, cinco opções adicionais ao cenário no qual os resultados foram obtidos, a saber:

- Uniforme: considerando-se todos os pesos distribuídos igualmente;
- Redução: mantendo-se a importância do maior critério e reduzindo os valores dos demais;
- Inversão 1: invertendo-se a ordem do cenário considerado, dando-se maior importância ao segundo critério;
- Inversão 2: invertendo-se a ordem do cenário, dando-se maior importância ao segundo critério e reduzindo os demais.

A partir dos resultados processados pelo Decision Lab pode-se chegar às seguintes conclusões:

- Em todos cenários testados os fluxos líquidos não são praticamente alterados; isto evidencia uma tendência de pequenas alterações de ordem das alternativas e de valores dos fluxos;
- A linha de corte de fluxos positivos para negativos permaneceu constante entre as opções Xstrata, Rio Tinto e Anglo Gold;
- Constatou-se inversão de ordem entre as alternativas Vale e BHP, quando da aplicação da opção Inversão 2;
- As variações dos valores dos fluxos não foram muito sensíveis às mudanças dos pesos.

Conclui-se dessa forma que os resultados obtidos com os pesos selecionados comportam-se de maneira consistente quando se os avalia em relação a outros cenários julgados prováveis.

## 5. Conclusões

O método PROMÉTHÉE II revelou-se bastante útil para apoio às decisões envolvidas no caso estudado, pelo fato de combinar uma forma de classificar alternativas – as principais empresas de mineração – por valor de mercado, com resultados de desempenho ambiental baseados em metodologia internacionalmente reconhecida e aceita pelas agências de classificação de risco de mercado. Dentre os resultados mais positivos obtidos com a implementação do método pode-se citar: construção de uma forma organizada de se pensar sobre o desempenho ambiental dos principais *players* globais de mineração; e possibilidade de *disclosure* com maior transparência para os acionistas da empresa interessada, agências de classificação de risco e demais *stakeholders*, por meio de uma metodologia estruturada, evitando-se assim preciosas perdas de tempo, estas sem resultado prático significativo. A partir da montagem inicial do quadro de alternativas, critérios e pesos podem-se compartilhar as soluções alternativas com fácil entendimento, sendo sua validação obtida de maneira bastante prática. Simularam-se os resultados por variações de pesos, em função do grau de importância que pode ser atribuído aos critérios de desempenho ambiental.

Em relação às questões práticas referentes à aplicação do método, mormente no que diz respeito aos resultados processados, foi possível concluir pela comprovação da aplicabilidade do mesmo, com os resultados dos fluxos líquidos do PROMÉTHÉE II testados em análises de sensibilidade. Isto permitiu observar com clareza as flutuações em relação a modificações de valores associados aos pesos. Além disto, o processamento dos dados através do *software* Decision Lab possibilitou uma abordagem simples da questão, fundamentada em análises de sensibilidade, o que conduziu a resultados objetivos e de fácil entendimento. Neste particular estudo de caso, uma limitação observada foi a inexistência de algumas informações a respeito dos indicadores de desempenho ambiental das empresas, fazendo com que o método assumisse valores nulos, não devidos a uma excelência operacional sobre um determinado tema. Apesar da ausência de informações sobre alguns indicadores ambientais, a percepção das agências de risco a respeito do desempenho ambiental da Vale melhorou, corroborando com a necessidade de se prover as partes interessadas da empresa, informações quantitativas e com um mínimo de conjecturas não adequadamente fundamentadas sobre a sua sustentabilidade ambiental. Chegou-se então à conclusão de que a aplicação do método

PROMÉTHÉE II conseguiu atingir plenamente seu propósito no sentido de organizar um processo de decisão complexo, que pressupõe interatividade e simulações, chegando a um resultado que dá transparência à efetividade da gestão ambiental dos principais *players* globais de mineração.

O estudo apresentado neste artigo pode ainda ser complementado considerando os demais indicadores ambientais do GRI, mesmo aqueles de caráter qualitativo (descritivo com ações específicas de gestão ambiental), unido um enfoque qualitativo ao uso do método PROMETHÉE II. Esta iniciativa poderá propiciar uma avaliação mais abrangente da gestão ambiental das empresas mineradoras e, com isso, possibilitar uma avaliação em termos de sustentabilidade mais representativa.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem a Companhia Vale SA pela colaboração sem a qual a preparação deste trabalho teria sido impossível. A preparação deste artigo foi parcialmente apoiada pelo CNPq, através dos processos de números 310603/2009-9 e 502711/2009-4.

### **Referências**

**BELTON, V. & STEWART, T. J.** Multiple criteria decision analysis: an integrated approach. Boston: Kluwer Academic Press, 2002.

**BOUYSSOU, D.** Building Criteria: A Prerequisite for MCDA. LAMSADE. Paris: Université de Paris Dauphine, 1990.

**BRANS, J.P. & MARESCHAL, B.** PROMÉTHÉE-GAIA: une méthodologie d'aide à la decision en présence de critères multiples. Bruxelles: Éditions de L'Université de Bruxelles, 2002.

**GALLOPIN, G.C.** Environmental and sustainability indicators and the concept of situational indicators. A system approach. *Environmental Modelling e Assessment*, v. 1, p.101-117, 1996.

**GOMES, L.F.A.M.** Teoria da decisão. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2007.

**GOMES, L.F.A.M.; GOMES, C.F.S. & ALMEIDA, A.T.** Tomada de Decisão Gerencial Enfoque multicritério. 3a ed. revista e ampliada. São Paulo: Editora Atlas S.A, 2009.

**GRI.** What is GRI? In: <http://www.globalreporting.org/AboutGRI/WhatIsGRI/> Acesso em dezembro de 2009, 2009.

**KEENEY, R. & RAIFFA, H.** Decisions with multiple objectives – Preferences and value tradeoffs. New York: John Wiley and Sons, 1976.

**LEYVA-LÓPEZ, J.C & FERNANDÉZ-GONZÁLEZ, E.** A new method for group decision support based on ELECTRE III methodology. *European Journal of Operational Research*, 148 (1), p. 14-27, 2003.

**MACEDO, M.G.C., GOMES, L.F.A.M. & RANGEL, L.A.D.** Indicadores de sustentabilidade ambiental na indústria de mineração: avaliação pelo método PROMÉTHÉE II. Artigo submetido para publicação em *Produção*, 2009.

**MORAIS, D. C. & ALMEIDA, A. T.** Modelo de Decisão em Grupo para Gerenciar Perdas de Água. *Pesquisa Operacional*, v. 26, n. 3, p. 567-584, 2006.

**ROY, B.** Méthodologie multicritère d'aide à la décision. Paris: Economica, 1985.

**ROY, B. & BOUYSSOU, D.** Aide multicritère à la décision: méthodes et cas. Paris: Economica, 1993.

**SAATY, T.L.** The analytic hierarchy process. New York: McGraw-Hill, 1980.

**SAATY, T.L.** Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process. Pittsburgh: RWS Publications, 1994.

**VISUAL DECISION, INC.** Prométhée-Gaia software. Version 1.01.0386, ULB/VLB Students. In: <http://www.visualdecision.com/dlab.htm> Acesso em dezembro de 2009, 2009.

**WWF-Brazil.** O que é desenvolvimento sustentável? In: <http://www.wwf.org.br>. Acesso em dezembro de 2009, 2009.