

MODELAMENTO E ESTIMATIVA DE CUSTOS EM PROJETOS DE MINERAÇÃO DE CARVÃO, FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Fernando A. Cantini CARDOZO¹; Carlos O. PETTER² e Jorge D. GAVRONSKI³

¹UFRGS, fernando.cardozo@gmail.com; ²UFRGS, cpetter@ufrgs.gov.br; ³UFRGS, gravonski@ufrgs.gov.br

RESUMO

Os primeiros estudos de viabilidade para algum projeto de mineração são iniciados logo após a determinação das reservas de minério. Os estudos têm a finalidade de mostrar se o investimento em detalhamento geológico, planejamento de layout da mina, estudos metalúrgicos e outras atividades podem ser vantajosas. Como tratam-se de estudos preliminares, algumas características certamente não estarão suficientemente detalhadas para definir com segurança o método de lavra, layout da mina, a rota de processo, a qualidade do produto final e outras informações para o desenvolvimento de projetos definitivos. Devendo estes fatores serem respaldados pela experiência e perícia dos engenheiros que conduzem o estudo. Como costumeiramente descrito na literatura técnica e, da mesma forma, planejado pelas empresas, um projeto de mineração é estruturado em fases: Fase conceitual, pré-viabilidade, viabilidade e detalhamento. O termo conceitual. Entenda-se como engenharia, o dimensionamento, ainda que preliminar, de instalações ou equipamentos. Na fase conceitual do projeto, correspondente a uma fase muito preliminar do projeto, a utilização de uma ferramenta para avaliação econômica expedita que recaia sobre os dados disponíveis até o pode ser estratégica no sentido de ranquear alvos de aprofundamento de estudos (adensar sondagens, caracterização tecnológica, estudos de mercado) e/ou escolha por determinado portfólio (opção de jazida e/ou método de lavra a ser utilizado). Para o caso da mineração de carvão, a avaliação de projetos, é uma realidade atual frente a necessidade de novas jazidas e diferentes métodos de lavra, em razão do esgotamento de jazidas, da necessidade de redução de custos e de lavra em novas condições (aprofundamento de minas). Sendo assim, ferramentas que permitam uma avaliação rápida, respaldando a tomada de decisão é de suma importância. Assim sendo, o modelo de O'Hara se encaixa exatamente neste contexto, pois com a introdução de parâmetros básicos. O modelo propõe como resposta, custo de capital e custo operacional do empreendimento. Considerando o supracitado, este trabalho revisa, e expõe considerações quanto a ferramentas de estimativa de custos no caso da mineração de carvão. São apresentadas considerações quanto ao modelo de O'Hara, as ferramentas hoje disponíveis e sua aplicabilidade (software MAFMINE) na indústria carbonífera, quanto a tomada de decisão por jazida e método de lavra.

Palavras-chave: Estimativa de Custos. Avaliação Financeira. Mineração de Carvão

ABSTRACT

The first feasibility studies for a mining project are started soon after the determination of the ore reserves. The studies are intended to show whether the investment in geological detail, layout of the mine planning, metallurgical studies and other activities can be advantageous. As these preliminary studies, some features certainly are not detailed enough to safely set mining method, layout of the mine, the process, the quality of the final product and other information for the development of final projects. And should these factors be backed by the experience and expertise of the engineers who lead the study. As usually described in technical literature and, similarly, planned by the companies, a mining project is structured in phases: conceptual, feasibility Phase, feasibility and detailing. The term conceptual. Read how engineering, scaling, although preliminary, of facilities or equipment. In the conceptual phase of the project, corresponding to a very preliminary phase of the project, the use of a tool for evaluating expeditious economic that fall on the data available until the can be rankear towards strategic targets of deepening (intensifying polls, technological characterization, market studies) and/or by a particular portfolio choice (choice of deposit and/or tilling method being used). For the case of coal mining, evaluation of projects, is a current reality facing the need of new deposits and mining methods, due to the fatigue of deposits, the need for cost reduction and plowing in new conditions (deepening). Therefore, tools that allow a quick evaluation, endorsing the decision-making process is of the utmost importance. Therefore, the model of O'Hara fits exactly in this context, as with the introduction of basic parameters. The model proposes an answer, capital cost and operating cost of the project. Considering the above, this paper reviews, and expose considerations the cost estimation

tools in the case of coal mining. Are considerations regarding the model of O'Hara, the tools available today and your applicability (MAFMINE software) in the coal industry, as the decision-making for mine and mining method.

Key-Words: Coste Estimate. Financial Assessment. Coal mining

1 INTRODUÇÃO

Modelos, em todas ciências tem funções similar, representar de maneira simplificada fenômenos reais, muitas vezes complexos. Deste modo permitindo o melhor entendimento destes. Em engenharia é comum utilizar-se de modelos simplificados, sejam físicos ou computacionais.

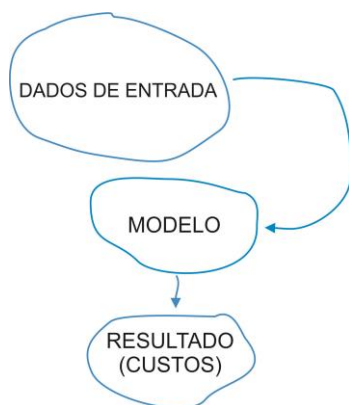
No ramo da Engenharia Econômica, a utilização de modelos econômicos, visa representar de maneira simplificada uma ocorrência real. Um possível empreendimentos ou uma modificação no sistema produtivo. Isto com o fim de avaliar a sanidade financeira (viabilidade). Previamente a execução do mesmo e com o mínimo de consumo de recursos.

No uso de tais recursos voltados ao setor mineral o grande precursor foi Alan O'Hara (O'HARA; 1980), sul africano, expoente no modelamento econômico voltado ao setor mineral. Apresentando modelos na forma de equações matemática, as quais apresentam custos em função de parâmetros de entradas variados (Equação 1).

$$custo = A * entrada^B \quad (1)$$

Sendo em geral estes modelos regreções não lineares aplicadas a uma gama de dados conhecidos do setor. Na figura 1 apresenta-se o fluxo natural de um modelo.

Figura 1- Fluxo de um modelo



O uso de modelos em análise econômica de projetos de mineração surge como uma alternativa ao levantamento de custos tradicional, com detalhamento de despesas, equipamentos, consumos e prazos. Trabalho tradicionalmente exaustivo e dependente de informações privilegiadas. Wellmert *et al.* (2008), por exemplo, aponta como sendo as principais fontes de informações sobre custos na indústria mineral. Relativos a aquisição de equipamentos, operação de lavra, de equipamentos, despesas com pessoal, entre outras. Sendo:

- Informações obtidas durante visitas e informalmente;
- Relatório internos de empresas, quando estes estão disponibilizados;
- Revistas e publicações diversas sobre mineração.

Entretanto, mesmo os custos de implementação sendo de fundamental importância para o desenvolvimento de projetos, o acesso a estes dados não é de todo facilitado. Devido a relevância que dados como os citados têm, muitas empresas hoje, tem por proposta comercializa-los.

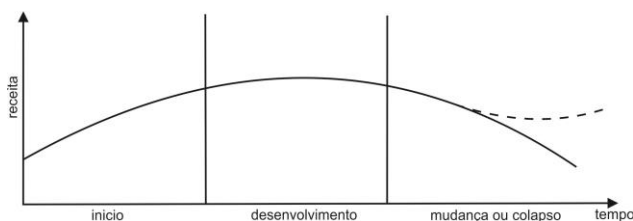
Assim considerando, o uso modelos econômico é uma alternativa, aos estudos financeiros tradicionais.

Carriconde (2010), comparou e analisou as diferenças encontradas entre as estimativas de projetos de mineração feitas por modelagem matemática (O'Hara) e por estudo de pré-viabilidade tradicional, o qual quantificava equipamentos e infraestrutura necessária. Assim concluindo pela excelente aplicabilidade dos modelos.

2 ECONOMIA E INDÚSTRIA CARBONÍFERA

Rybak e Rybak (2016), fazem considerações quanto a indústria carbonífera, salientando a importância das estratégias e mudanças necessárias para manter a vitalidade do empreendimento quanto a produção e custos; sendo que da ausência de mudanças, tende-se ao colapso do empreendimento (Figura 2)

Figura 2 – Ciclo econômico de um empreendimento



Fonte: Adaptado de Rybak e Rybak (2016)

Considerando o supra disposto é plausível supor que mesmo para os empreendimentos em plena operação a avaliação de opções estratégicas é fundamental para o futuro do empreendimento. Neste cenário as avaliações econômicas são passo fundamental na avaliação das opções, sejam de implementação de novas tecnologias ou estratégias de lavra. Um exemplo seria a automatização de minas semimanuais ou desenvolvimento de novos painéis de lavra, para a mineração subterrânea.

Para o caso de novos empreendimentos o modelamento econômico se encaixa nas fase de estudo conceitual e previabilidade onde com uma baixa gama de informação nos permitiriam mensurar quanto as opções existentes. Principalmente e estudos conceituais de lavra de carvão algumas questões são elencadas:

- i. céu aberto x subterrâneo
- ii. câmaras e pilares x longwall
- iii. longwall x shortwall
- iv. drill-blast-rolle x continuos miner

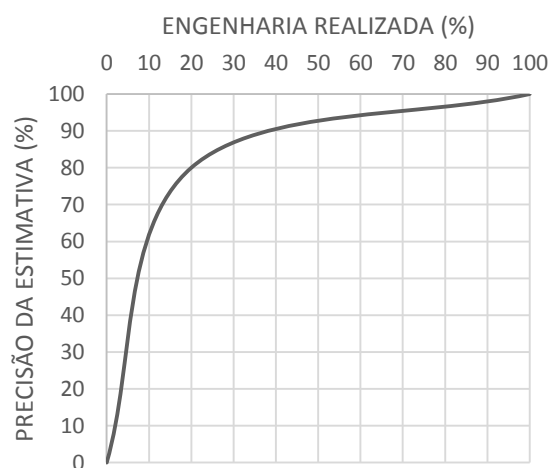
Claramente muito dos questionamentos são técnicos e referentes as características físicas das jazidas, entretanto considerando a estado da arte atual da indústria mineral, quanto as opções de equipamentos disponíveis as industrias, muito referente a escolhas tomadas, tem viés estritamente econômico.

3 MODELAMENTO E ESTIMATIVAS DE CUSTOS

Segundo Jimeno e Revuelta (1997), a estimativa de custos é fundamental a projetos de engenharia. Segundo Petter (2015) e D'Arrigo (2012), para a estimativa de custos de um projeto de mineração, quanto maior a porcentagem de engenharia concluída, menor a variabilidade no custo estimado. Nestes termos a Lei de Pareto se

encaixa como um exemplo ilustrativo, de modo que segundo tal, com 20% da engenharia realizada teríamos 80% de precisão em uma possível estimativa referente ao todo planejado. Na Figura 3 esta ilustrada a relação proposta pela lei de Pareto.

Figura 3 - Lei de Pareto aplicada à estudos de engenharia



Porém, deve-se lembrar que a Lei de Pareto orienta quanto a dinâmica do comportamento das estimativas de custo. Não sendo está uma regra rígida a se basear, de fato, outras fontes apresentam-se mais otimistas. Abaixo na Tabela 1 é apresentado a precisão característica para diferentes fases de projeto, segundo o Manual de Estimativas de custos da indústria de mineração australiana (LANZ; NOAKES, 1993).

Tabela 1 Precisão das estimativas de custos em diferentes fases de projeto

Fase de Projeto	Precisão
Estudo Conceitual	65 – 70 %
Pré Viabilidade	75 – 80%
Viabilidade	85 – 90 %
Definitivo	90 – 95%

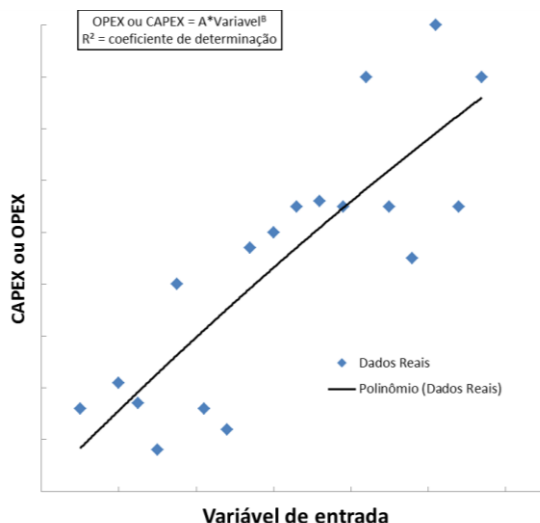
Fonte: Adaptado de Lanz e Noakes (1993)

Assim, considerando as faixas de precisão suprapropostas, vemos que a estimativa de custos de em mineração por modelos se encaixa quase que adequadamente as fases de estudo Conceitual e de Pré- Viabilidade. Onde temos poucos dados conclusivos a disposição.

4 PRINCÍPIOS DO MODELAMENTO ECONÔMICO

Estudos como os de Sayadi *et al.* (2011), Sayadi *et al.* (2014) e Oraee *et al.* (2011); apresentam o uso de regressão não linear (Equação 1 e Figura 4), como ferramenta simples para estimativa de custos operacionais e capitais para equipamentos de mineração. Sendo a metodologia análoga entre estes e os demais autores (O'HARA, 1980; BAUDSON, 2008 e D'ARRIGO, 2012) com referencia a processos que envolvem diferentes escalas, como o custo geral de um empreendimento. De maneira uniforme a metodologia utilizada é a regressão não linear simples, em que as variáveis custos são estimadas em função de uma única variável de entrada. Sendo as regreções feitas sobre gamas de dados reais de empreendimentos (Figura 4).

Figura 4 – Ajuste de função não linear a dados reais de empreendimentos



Considerando-se então uma gama n de pares de valores x e y (variável de entrada e de saída respectivamente), o problema consiste em determinar os parâmetros de uma fórmula empírica que represente a relação funcional entre os valores. Sayadi *et al.* (2011) e Sayadi *et al.* (2014) destacam em seus estudos o uso de equação potencial (Equação 1), estes também se baseando no modelo proposto por O'Hara.

Assim considerando n para de dados $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_n, y_n)$.

Função potencial,

$$y(x) = A * x^B \quad (2)$$

Logaritmando-se a equação 2,

$$\ln(y(x)) = \ln(A * x^B) \quad (3)$$

Reescrevendo-se,

$$\ln y(x) = \ln A + B * \ln x \quad (4)$$

Logo adota-se $Y = \ln y(x)$, $X = \ln x$, $b = \ln A$ e $a = B$, Sendo então o caso de um ajuste linear.

Sendo a solução geral:

$$a = \frac{\overline{X * Y} - \bar{X} * \bar{Y}}{\overline{X^2} - \bar{X}^2} \quad (5)$$

$$b = \bar{Y} - a * \bar{X} \quad (6)$$

D'Arrigo (2012) apresenta a compilação de diversos modelos de custos voltados a setor minerário (originalmente apresentados por O'Hara) na forma de um aplicativo computacional de livre acesso denominado MAFMINE (disponível em <<http://www.mafmine.com.br/v3/#>>). Diferencia-se nos trabalhos apresentado por D'Arrigo (2012) a introdução de índice de atualização dos preços obtidos. Como o Big Mac Index (ONG, 1997) que permite de forma simples e intuitiva atualizar tempo e espacialmente os valores de custos.

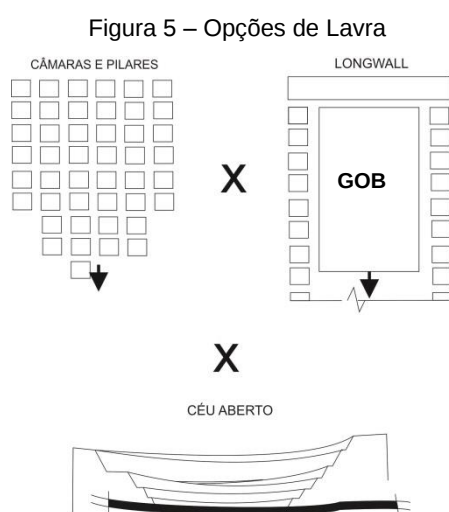
5 MODELAMENTO E AVALIAÇÃO APLICADO A LAVRA DE CARVÃO (EXEMPLO DE APLICAÇÃO)

Como já citado anteriormente o modelamento econômico em mineração é compatível com estudos conceituais e de pré viabilidade, onde até o momento são disponíveis pequena gama de informações acerca das jazidas a serem exploradas. Todavia, uma característica implícita as jazidas de carvão sobretudo as (sul-brasileira) é a regularidade geométrica do corpo e das características do minério. Deste modo, em primeiros estudos convém se considerar os métodos de lavra passíveis de uso. Sendo (i) Câmaras e Pilares (C&P), (ii) Longwall (LW) e (iii) Céu Aberto (C.A.), os mais utilizados no mundo.

Cabe salientar que os métodos supracitados tem sua aplicação dependente de características da

jazida, como espessura da camada de carvão, profundidade da mesma, propriedades geotécnicas dos estratos, produtividade almejada, entre outras.

Entretanto considerando um cenário hipotético, mas não irreal, em que tenhamos a possibilidade de explorar uma mesma mineralização de carvão que se apresenta com profundidade variando entre 80 e 300 metros, em função do perfil topográfico regional. Com espessura média de 2,5 metros e inclinação inferior a 10°. Fica plausível em um primeiro momento se levantar a hipótese de lavra pelos três métodos supracitados (Figura 5)



Supondo uma produção anual de 2 Mtpa de ROM e as premissas básicas (Tabela 2). Aplicou-se a metodologia de *Quick Evaluate* de O'Hara através do software *Mafmine*.

Tabela 2 – Premissas para avaliação econômica

Método	C&P	LW	C. A.
Profundidade	200 m	300 m	80 m
Decapagem	-	-	320 Mton
Rec. Jazida	40%	70%	100%
ROM	2 Mtpa	2 Mtpa	2 Mtpa
Dias úteis	252	252	252
Frentes	5	1	-
Dias trab.	252	252	252
Prod. dia (ton)	7936.508	7936.508	7936.508
Rec. Benef.	50%	50%	50%
Concentrado (ton)	3968.254	3968.254	3968.254

Assim obtendo os seguintes resultados de investimentos necessários (Tabela 3), os quais podem ser comparados com estudos apresentados em outros trabalhos.

Tabela 3 – Premissas para avaliação econômica

	OPEX (US\$/ton)	CAPEX (MUS\$)
C&P	16.28*	78.6*
	19.74 ¹	-
LW	22.58*	170.96*
	27 ²	194 ²
C.A	9.12*	151.87*
	-	180 ¹

*MAFMINE

¹ Gavronski *et al.* (2016)

²Cardozo (2015)

6 CONCLUSÃO

Conclui-se com base nos dados obtidos de custos, que a utilização de modelos econômicos é de grande aplicabilidade para estudos conceituais e de pré viabilidade. A aplicabilidade da metodologia é comprovada para o estudo da lavra de carvão. Vide a celeridade obtida para o estudo de diferentes estratégias de lavra. Gavronski *et al.* (2016) e D'Arrigo *et al.* (2011) também destacam tal celeridade obtida pelo uso de modelos econômicos para os estudo em lavra de carvão.

Estudos futuros devem levar em conta a possibilidade de levar em consideração a possibilidade de ajuste de modelos econômicos por regressão multivariada, análogo aos trabalhos desenvolvidos por Sayadi *et al.* (2011), Sayadi *et al.* (2014) e Oraee *et al.* (2011). Assim, considerando mais de uma variável de entrada, possibilitando melhor aderência do ajusto a realidade da lavra de carvão.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos realizadores do evento e avaliadores, pela possibilidade de divulgação do conhecimento.

8 REFERÊNCIAS

- BAUDSON, Adolfo José Gonçalves Stavaux. **APLICATIVO PARA A AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE JAZIDAS MINERAIS**. 2008. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mineral, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.
- CARDOZO, Fernando Alves Cantini. **Longwall: estado da arte, geomecânica, planejamento e aplicação**. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- COLLINS, Alan R.; HANSEN, Evan; HENDRYX, Michael. Wind versus coal: Comparing the local economic impacts of energy resource development in Appalachia. **Energy policy**, v. 50, p. 551-561, 2012.
- D'ARRIGO, Rafael Freitas *et al.* ESTIMATIVA PRELIMINAR DE CUSTOS DE CAPITAL E OPERACIONAL DE UMA MINA DE CARVÃO A CÉU ABERTO ATRAVÉS DO MODELO DE O'HARA. In: **III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral**. Gramado:[sn]. 2011.
- D'ARRIGO, Rafael Freitas. **Modelo de estimativa de custos operacionais e de capital em projetos de mineração em fase conceitual baseado no modelo de O'Hara**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- RYBAK, Aurelia; RYBAK, Aleksandra. Possible strategies for hard coal mining in Poland as a result of production function analysis. **Resources Policy**, v. 50, p. 27-33, 2016.
- GRAVRONSKI, Jorge D., PETTER, Carlos O., ESCOBAR B., D'ARRIGO, Rafael. Cost Estimation in coal mining: The Evolution of Quick Evaluation Methods. In: **24th World Mining Congress**, Proceedings, Rio de Janeiro, IBRAM, 2016.
- LANZ, T., NOAKES, M. **Cost estimation handbook for the Australian mining industry**. Australasian Institute of Mining and Metallurgy (Aus IMM), Carlton South, 1993.
- ONG, Li Lian. Burgernomics: the economics of the Big Mac standard. **Journal of International Money and Finance**, v. 16, n. 6, p. 865-878, 1997.
- ORAE, B.; LASHGARI, Ali; SAYADI, Ahmad Reza. Estimation of capital and operation costs of backhoe loaders. **SME Annual Meeting**, 2011.
- O'HARA, T. Alan. **Quick guides to the evaluation of orebodies**. publisher not identified, 1980.
- PETTER, Renato Aurélio. **A TÉCNICA DE ANÁLISE DE RISCO ECONÔMICO APLICADA A DIFERENTES CENÁRIOS DE INVESTIMENTOS CASOS DE ESTUDO: Minas de elementos terras raras Reciclagem de rejeitos de material de demolição e construção civil**. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- REVUELTA, Manuel Bustillo; JIMENO, Carlos López. **Manual de evaluación y diseño de explotaciones mineras**. 1997.
- SAYADI, Ahmad Reza; LASHGARI, Ali; PARASZCZAK, Jacek Jack. Hard-rock LHD cost estimation using single and multiple regressions based on principal component analysis. **Tunnelling and underground space technology**, v. 27, n. 1, p. 133-141, 2012.
- SAYADI, Ahmad Reza; KHALES, Mohammad Reza; BORJI, Mahsa Khoshfarman. A parametric cost model for mineral grinding mills. **Minerals Engineering**, v. 55, p. 96-102, 2014.
- WELLMER, Friedrich-Wilhelm; DALHEIMER, Manfred; WAGNER, Markus. **Economic Evaluations in Exploration**. 2 ed. Berlin: Springer, 2008. 250 p.