

CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DOS GASES DE EFEITO ESTUFA NA MINERAÇÃO DO CARVÃO MINERAL A CÉU ABERTO

Mateus GUIMARÃES DA SILVA¹; Ronaldo HOFFMANN²; Antonio Carlos LUZ LISBÔA³

¹Unipampa, mateussilva@unipampa.edu.br; ²Ufsm, hoffmann@ufsm.br; ³Unicamp, lisboa@feq.unicamp.br

RESUMO

A Política Nacional sobre Mudança Climática sancionada na Lei 12.187/2009 sugere que os setores produtivos conheçam as emissões de gases de efeito estufa (GEE) dos seus respectivos processos com a finalidade de apoiar os esforços do governo brasileiro com ações mitigadoras para atingir as metas de redução das emissões dos GEE acordadas na conversão do clima. A indústria de geração de energia a carvão mineral é um dos principais responsável pela emissão dos GEE. As tecnologias utilizadas têm despertado preocupações ambientais pelas quantidades relevantes de consumo de energia e emissões de GEE. Neste trabalho são apresentados os primeiros resultados de uma avaliação do ciclo de vida do carvão mineral extraído de uma mina a céu aberto no Brasil. O principal objetivo foi identificar e quantificar o consumo de energia e as emissões de GEE associados a produção do carvão mineral e analisar o potencial de aquecimento global. Foi elaborado um inventário dos principais insumos, do consumo energético e equipamentos utilizando dados primários de uma mineradora do sul do Brasil e analisado as etapas de lavra a céu aberto, transporte e cominuição. Os resultados mostraram que a etapa de lavra consome a maior quantidade de energia, correspondendo a 0,0227 MJ/kg carvão (58% do total), e as emissões fugitivas são as principais responsáveis para o aquecimento global, alcançando 0,0213 CO_{2eq}/kg carvão (87,5% do total). Ambos valores são inferiores aos relatados em estudos realizados em processos semelhantes.

Palavras-chave: lavra a céu aberto, avaliação de ciclo de vida, gases de efeito estufa, emissões fugitivas

ABSTRACT

The National Policy on Climate Change enacted in Law 12,187/2009 suggests that the productive sectors should know the greenhouse gas emissions (GHG) of their respective processes in order to support the efforts of the Brazilian government with mitigation actions to achieve the goals of Reduction of GHG emissions agreed in climate conversion. The coal-fired power generation industry is a major contributor to GHG emissions. The technologies used have raised environmental concerns for the relevant amounts of energy consumption and GHG emissions. This paper presents the first results of a life cycle assessment of mineral coal extracted from an open pit mine in Brazil. The main purpose was to identify and quantify the energy consumption and GHG emissions associated with the production of coal and analyze the global warming potential. The life cycle inventory of the main inputs, energy consumption and equipment was drawn up using primary data from a mining company in southern Brazil and analyzed the steps of open pit mining, transportation and comminution. The results showed that the mining stage consumes the largest amount of energy, corresponding to

0.0227 MJ / kg coal (58% of the total) and fugitive emissions are the main responsible for global warming, raising 0.0213 CO₂eq / kg coal (87.5% of the total). Both values are lower than reported studies conducted in similar processes.

Key-Words: greenhouse gases, life cycle assessment, open-pit mining

1 INTRODUÇÃO

Embora nos últimos anos tenha aumentado os desafios atribuídos ao setor energético mundial, em relação ao aquecimento global, pela inserção de fontes renováveis na matriz energética, os combustíveis fósseis ainda continuam sendo estratégicos para atender a crescente demanda de energia (EPE, 2016). O carvão mineral continua sendo a principal fonte de geração de energia elétrica no mundo, ultrapassando o gás natural, seu principal concorrente, em aproximadamente duas vezes (IEA, 2015).

Existem cerca de 894 bilhões de toneladas de reservas de carvão comprovadas em todo o mundo. Isso significa que há carvão suficiente para durar cerca de 110 anos com as taxas de produção atuais. Em contraste, reservas comprovadas de petróleo e gás são equivalentes a aproximadamente 52 e 54 anos, respectivamente, nos níveis de produção atual (WCA, 2017).

As reservas de carvão mineral comprovadas do Brasil são da ordem de 32 bilhões de toneladas, representam apenas 0,1% da distribuição mundial, e estão situadas predominantemente no sul do país - cerca de 90,1% estão situadas no estado do Rio Grande do Sul; 9,6% no estado de Santa Catarina e 0,3% no Paraná. Outras pequenas reservas podem ser encontradas nos estados do Amazonas, Pará, Pernambuco, Maranhão e São Paulo (EPE, 2016). A maior jazida está localizada em Candiota, localizada no sul do estado Rio Grande do Sul, onde as reservas chegam a 38,7% do total nacional. Geologicamente, o carvão de Candiota pertence a formação Rio Bonito, que caracteriza-se por sedimentos de granulometria variável e pelo confinamento dos leitos de carvão por camadas de argilitos (Aboarrage, 1986). Esta jazida possui espessura média de leitos de carvão de 4,5 m e coberturas menores que 50 m, permitindo a aplicação do método de lavra a céu aberto, o que facilita a extração do carvão em relação aos aspectos econômicos.

A matriz de energia elétrica brasileira é predominantemente renovável, aproximadamente,

62% é procedente de fonte hídrica (EPE, 2016). O Brasil possui muitos recursos hídricos para continuar investindo neste setor, no entanto, nos últimos anos os investidores vêm encontrando dificuldades para construir grandes reservatórios para as usinas hidrelétricas por questões ambientais e sociais, especialmente na amazônica, região que possui o maior potencial hidrelétrico por bacia hidrográfica; e ainda com a expansão significativa da participação das fontes intermitentes (eólica e solar fotovoltaica), que provavelmente continuará aumentando nos próximos anos, torna-se necessário a utilização de fontes de energia firme e efetivamente controlável para abrandar os possíveis efeitos dos cenários negativos que podem surgir pelos longos períodos de estiagem a fim de atender as necessidades do mercado e garantir a segurança energética. As grandes reservas de carvão disponíveis no sul do país a preços estáveis e relativamente baixos tornam-se uma opção muito importante para o mix energético. No entanto, há alguns aspectos ambientais negativos associados à utilização do carvão brasileiro que precisam ser analisados, como a grande quantidade de gases de efeito estufa (GEE) liberados durante a sua mineração e utilização. Foram encontrados vários trabalhos na literatura dedicados a estudar as emissões dos GEE da cadeia produtiva do carvão mineral, tanto no setor energético quanto carboquímico, utilizando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida, ferramenta reconhecida para avaliar impactos ambientais relacionados direta ou indiretamente com os processos e produtos.

Burmistrz et al. (2016) avaliaram a pegada carbono, utilizando a metodologia de ACV, do hidrogênio produzido a partir do carvão sub-betuminoso e linhito, abrangendo duas tecnologias de gaseificação de fluxo arrastado - GE Energy/Texaco e Shell - e as principais etapas a montante como mineração, processamento e transporte do carvão da mina até a usina de gaseificação. Para o estágio de mineração, os resultados indicaram as menores emissões para o carvão sub-betuminoso utilizando ambas as tecnologias de gaseificação, as quais foram igual a

1,94 kg CO_{2eq}/GJ produzido contra 3,24 kg CO_{2eq}/GJ de carvão produzido para o linhito.

Restrepo et al. (2015) realizou um estudo de ACV da produção de carvão energético obtido de uma mina subterrânea do sul do Brasil. A fronteira do sistema foi limitada aos processos de lavra subterrânea por meio da técnica de câmeras e pilares, transporte do carvão bruto e beneficiamento. Para a categoria de impacto ambiental de aquecimento global, os resultados mostraram que 0,0856 kg de CO_{2eq}/kg de carvão energético são emitidos durante a mineração, valor, segundo os autores, inferior de processos semelhantes utilizados em outros países.

Atilgan e Azapagic (2015) realizaram o primeiro estudo de impacto ambiental do ciclo de vida da energia elétrica gerada nas usinas termelétricas a combustíveis fósseis (*hard coal*, linhito e gás natural) na Turquia, responsáveis pelo abastecimento de três quartos da demanda nacional. Na fronteira do sistema, foram consideradas as etapas da mineração e processamento, transporte, geração de eletricidade, construção e descomissionamento da planta de geração. Os resultados do estudo indicaram que a eletricidade a partir do gás natural possui menor carga ambiental comparado com linhito e *hard coal* para a maioria das categorias de impacto consideradas. Na avaliação da categoria de aquecimento global, o *hard coal* é o maior poluidor.

Xiaoye et al. (2013) desenvolveram uma modelagem completa do ciclo de vida e uma avaliação comparativa de quatro tecnologias de geração de energia a carvão na China – ciclo combinado de gaseificação integrada, geração por ciclo de vapor subcrítico, supercrítico e ultra-supercrítico. O trabalho abrangeu para avaliação ambiental todos os estágios desde a mineração até a geração de energia, além da construção e desativação das termelétricas. A tecnologia de ciclo combinado de gaseificação integrada demonstrou ser a tecnologia mais limpa para a maioria das categorias de impacto ambiental, em particular no potencial de acidificação e potencial de formação de foto-oxidantes, porém, classifica-se como a tecnologia de mais alto custo de capital devido à sua complexidade. Em média, considerando todas as tecnologias de geração de energia avaliadas, na fase da mineração são emitidos aproximadamente 70,8 kg CO_{2eq}/kWh, representando 8,3% das emissões totais.

Babbitt e Lindner (2005) produziram um inventário do ciclo de vida dos insumos, energia e materiais representativos de 4 usinas termelétricas a carvão da Florida, envolvendo etapas da mineração (60% lavra subterrânea e 40% lavra a céu aberto), processamento do carvão, combustão e disposição final dos resíduos sólidos. Segundo os autores, a mineração e preparação do carvão foi responsável pela liberação de 319 kg de CO₂ e 6,92 kg de CH₄ por tonelada de carvão mineral produzido, representando aproximadamente 24% e 98% do total de emissões, respectivamente.

Spath, Mann e Kerr (1999) analisaram o ciclo de vida de uma planta térmica a carvão instalada nos Estados Unidos. A fronteira do sistema compreende todas as etapas envolvidas desde a mineração até a geração de energia elétrica. Na avaliação dos resultados, verificaram que 93% das emissões CO₂ são provenientes da combustão do carvão durante geração de energia.

Pelo que pôde ser observado, vários estudos de ACV envolvendo o carvão mineral foram encontrados na literatura, os quais muitas vezes consideravam a etapa de mineração na fronteira do sistema analisado, entretanto, não analisavam detalhes sobre como as emissões fugitivas, processos e insumos envolvidos na mineração podem contribuir no impacto ambiental. Além disso, nenhum estudo de ACV foi realizado até o momento para a mineração a céu aberto no Brasil, havendo uma lacuna a ser preenchida, fato que motivou a realização deste trabalho, principalmente pelas reservas expressivas de carvão mineral disponível no sul do país. Neste estudo foi elaborado um inventário dos principais insumos, do consumo de energia, equipamentos e emissões do estágio da mineração, utilizando dados primários de uma mineradora, além da análise do potencial de aquecimento global.

2 MÉTODOS

A metodologia utilizada foi baseada na ISO 14040 (ISO, 2006a) e ISO 14044 (ISO, 2006b). Os estudos de ACV têm basicamente a finalidade de identificar oportunidades para melhorar o desempenho ambiental durante o ciclo de vida de produtos, processos ou serviços. A ACV é composta por quatro etapas: (i) definição do objetivo e escopo do estudo; (ii) Inventário do ciclo de vida, (iii)

avaliação do impacto do ciclo de vida e (iv) interpretação dos resultados.

A categoria de impacto ambiental avaliada foi o aquecimento global (ou mudanças climáticas) por se tratar da categoria de maior conflito nas atividades ligadas ao setor de energia e de combustíveis fósseis. Para a sua avaliação foi utilizado a metodologia proposta pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) por meio dos fatores de caracterização (IPCC, 2007). Os fatores de caracterização indicam quanto um GEE contribui ao aquecimento global em relação ao CO₂ (substância de referência). Somente os três principais GEE foram avaliados – gás carbônico (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). Para o horizonte de 100 anos, o fator de caracterização para o CO₂ é igual a 1 kg CO₂/kg CO₂, para o CH₄ é igual a 25 kg CO₂/kg CH₄ e para o N₂O é igual a 298 kg CO₂/kg N₂O. Desta forma, é possível expressar todos os GEE na base de CO_{2eq}, como mostrado na equação 1.

$$E_{GEE} = \sum_j GWP_{ij} \cdot m_j \quad [\text{Eq. 1}]$$

Onde, E_{GEE} é a emissão total dos GEE (CO_{2eq}), GWP_{ij} é o potencial de aquecimento global da gás j (kg CO₂/kg j) e m_j é a emissão do gás j (kg j). O IPCC compila, atualiza e publica os potenciais de aquecimento global conforme a evolução do conhecimento e parecer dos cientistas especialistas em todo o mundo.

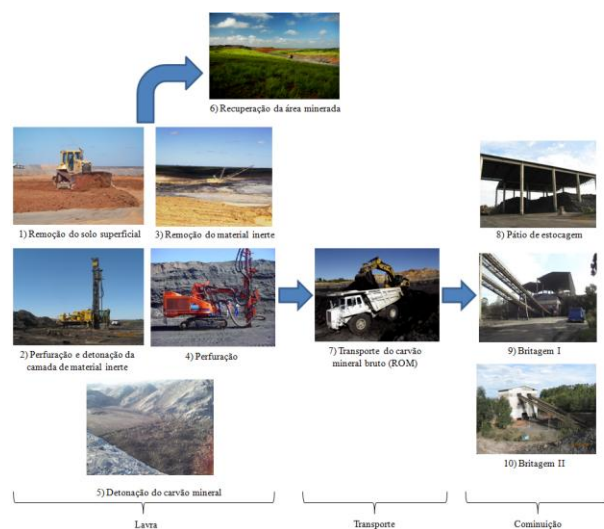
Para este trabalho utilizou-se como referência a mineradora da jazida de Candiota, que possui capacidade instalada para produção de 5.000.000 t/ano de carvão mineral energético (tipo CE3300 - 3.300 kcal/kg), localizada no município de Candiota, no sul do estado do Rio Grande do Sul. Nesta jazida é utilizada a lavra a céu aberto pelo método de lavra em tiras (*strip mining*), método que movimenta grandes volumes de estéril por tonelada de carvão, os quais podem provocar sérios impactos ambientais negativos caso a lavra e a recuperação da área degradada não sejam planejadas e executadas adequadamente (Soares, 2008).

3 DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS DA MINERAÇÃO A CÉU ABERTO

Uma breve descrição da rota tecnológica da mineração do carvão a céu aberto foi realizada para

facilitar a identificação, quantificação e análise dos principais aspectos ambientais de entrada e saída relacionados ao aquecimento global. A mineração do carvão é composta basicamente pelas etapas de lavra, transporte e beneficiamento e subdivididas em: i) remoção do solo superficial e armazenamento para uso posterior; ii) perfuração e detonação do material estéril que cobre a camada de carvão; iii) carregamento e transporte do material estéril fragmentado; iv) perfuração e detonação da camada de carvão; v) carregamento e transporte do carvão, vi) recuperação da área minerada e viii) cominuição. Na Figura 1 é apresentada as principais etapas da mineração que serão explicadas nas próximas seções.

Figura 1 - Etapas da mineração do carvão a céu aberto



3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

As características físico-químicas do carvão mineral dependem dos eventos ocorridos durante a acumulação vegetal na turfeira e da sua história orogênica (WCA, 2017). Cada jazida possui suas peculiaridades, refletindo nas características do carvão *in situ* e nos produtos beneficiados. Com a compilação dos dados do carvão expedido nos últimos 10 anos pela mineradora, foi determinado os valores médios da composição físico-química do carvão em base seca, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização físico-química do carvão mineral

<i>Análise imediata</i>	<i>MD±DP</i>	<i>Unidade</i>
Umidade total	16±0,00	%
Cinza	54,04±2,03	%
Matéria volátil	21,55±2,46	%
Carbono fixo	24,36±2,95	%
Poder calorífico superior	3078±198,75	kcal/kg
<i>Análise elementar</i>		
Carbono	33,72±1,26	%
Hidrogênio	2,34±0,06	%
Nitrogênio	0,66±0,12	%
Enxofre total	1,35±0,36	%
Enxofre pirítico	0,84±0,38	%
Enxofre sulfático	0,11±0,07	%
Enxofre orgânico	0,44±0,22	%
Oxigênio	8,96±0,92	%

Fonte: Gavronski (1997)

O alto teor de cinzas (54,04±2,03) deste carvão promove um baixo rendimento térmico, deste modo, a sua expedição é realizado na forma de run-of-mine (ROM), pois o mineral não admite beneficiamento e o consumo deve ser realizado próximo a mina, ambos por questões econômicas (Gavronski, 1997). Por outro lado, a principal vantagem da sua exploração é o baixo custo da lavra a céu aberto.

Segundo Silva et al. (2010) e Kalkreuth et al. (2006), a classificação (*rank*) do carvão mineral da jazida de Candiota é Sub-betuminoso C.

3.2 REMOÇÃO DA CAMADA SUPERFICIAL

Após a definição do plano de lavra e a delimitação da área a ser explorada, inicia-se a remoção da camada superficial (solo orgânico) de aproximadamente 40 cm. Este material é retirado por meio de escavadeira e caminhões de pequeno porte para que não seja mistura e perda nas demais operações de lavra, pois posteriormente será utilizado como base orgânica para a recuperação da camada vegetal em outras áreas mineradas com topografia já reconstituída (Gavronski, 1997).

3.3 DECAPEAMENTO

A decapagem é o processo que antecede a lavra da primeira camada de carvão, em que ocorre a remoção do material estéril constituído de argilitos, folhetos e arenitos. Nesta etapa são utilizados explosivos para detonar em média 772,9 t de material/mês, as malhas são executadas de 5 x 8 m de furação de 7 3/8" de diâmetro, realizadas por meio de uma perfuratriz rotativa. A relação média de estéril/minério é inferir a 2 m³/t de ROM. O consumo médio mensal de explosivo tipo emulsão é igual a 120.000 kg.

Todo o material inerte fragmentado é removido por uma draga de arraste (escavadeira dragline), com auxílio de um trator esteira, e colocado sobre uma área adjacente onde a camada de carvão já foi retirada, preenchendo, a cava deixada pela operação anterior.

3.4 LAVRA DA CAMADA DE CARVÃO

Após o decapeamento, os dois bancos de carvão que formam a camada candiota são extraídos em operações separadas após o desmonte com explosivos. O consumo anual de explosivo em média, considerando o desmonte da cobertura e das camadas de carvão, é igual a 1095460,00 ton. Para a perfuração do carvão são utilizadas carretas roto-percussivas, são perfurados 8.000 m/mês, com profundidade média de 2,65 m, por meio de uma perfuratriz roto-percussiva e detonados em média 150.000 m³ mensais, com malha de furação para desmonte de 3 x 6 m com de 4". O material estéril intermediário (basicamente argilito) é escarificado com trator de esteira e carregado em caminhões fora-de-estrada basculantes para recuperação topográfica de área já mineradas ou para impermeabilização de locais onde serão depositados cinzas que retornam das usinas. A drenagem é realizada por gravidade, porém na ocorrência de precipitação, são utilizadas bombas hidráulicas. Os principais equipamentos utilizados nesta etapa são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Equipamentos da etapa de lavra

Equipamentos	Nº.	Característica	Fonte de energia
Escavadeira	1	Dragline 1260W, capacidade de 30 m ³	Elétrica
Escavadeira	2	Capacidade de 9 m ³	Elétrica
Escavadeira	1	Retroescavadeira hidráulica, capacidade de 2,6 m ³	Diesel
Escavadeira	1	Retroescavadeira hidráulica, capacidade de 4,5 m ³	Diesel
Escavadeira	1	Retroescavadeira hidráulica, capacidade de 4 m ³	Diesel
Escavadeira	1	Retroescavadeira hidráulica, capacidade de 7 m ³	Diesel
Trator	7	Esteira	Diesel
Trator	1	Pneus	Diesel
Pás-carregadeira	1	Capacidade de 6 m ³	Diesel
Pás-carregadeira	1	Capacidade de 6,6 m ³	Diesel
Pás-carregadeiras	1	Capacidade de 7 m ³	Diesel
Perfuratriz	3	rotativa	Diesel
Perfuratriz	3	rotopercussiva	Diesel

3.5 TRANSPORTE DO CARVÃO ROM

Após o desmonte do carvão, o carregamento do carvão é realizado por escavadeiras e transportado até a unidade de cominuição com caminhões fora-de-estrada e caminhão tipo rodoviário, capacidade: 30t. A distância percorrida pela frota depende de onde esteja localizada a mina, podendo variar em torno

de 1 a 10 km. Na Tabela 3 são apresentados os principais equipamentos utilizados.

Tabela 3 – Equipamentos da etapa de transporte

Equipamentos	Nº.	Característica	Fonte de energia
Caminhão	7	Capacidade de 30t	Diesel
Caminhão	9	Fora-de-estrada, capacidade de 65t	Diesel

3.6 COMINUIÇÃO

A etapa de cominuição possui a finalidade de homogeneizar o tamanho do carvão mediante os processos de britagem e peneiramento do carvão procedente da mina (ROM) por meio de britadores primários e secundários e um conjunto de peneiras. O carvão é encaminhado para uma moega que alimenta o britador primário de mandíbulas, o produto é conduzido por gravidade para um circuito composto pela sequência: peneira primária, britador secundário de duplo rolo dentado; peneira secundária; britador terciário de duplo rolo dentado. Todos os equipamentos estão em série e são alimentados por energia elétrica. A capacidade nominal da unidade de cominuição é de 400 t/h e o produto final é um carvão com granulometria menor que 50 mm. Nota-se que todo o carvão ROM é beneficiado como CE3300, pois não ocorre geração de rejeitos no processo.

3.7 RECUPERAÇÃO DA ÁREA MINERADA

A recuperação das áreas mineradas ocorre de forma sistemática e concomitantemente ao desenvolvimento da lavra, a qual se processam os trabalhos de recomposição da topografia com material estéril, espalhamento do solo vegetal, correção do pH com calcário e correção dos macronutrientes do solo com fertilizantes NPK 5,20,20 (nitrogênio, fósforo e potássio). Na recomposição topográfica, procura-se deixar o terreno com os contornos mais próximos possível do original ou característico da região.

A cava primeiramente é impermeabilizada com material argiloso, logo é preenchida com cinza

proveniente da usina e recoberta com o material da decapagem (inerte), depois recebe uma fina camada de argila e solo vegetal e, por último, a revegetação com gramíneas e árvores nativas da região. Nestas operações são utilizados tratores, retro-escavadeira e caminhões.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 OBJETIVO E ESCOPO DO ESTUDO

O objetivo deste estudo foi identificar e quantificar o consumo de energia e as emissões de GEE da extração de carvão energético por meio da mineração a céu aberto. Para obtenção dos resultados, o escopo do estudo considerou três etapas da mineração – lavra a céu aberto, transporte do ROM e cominuição do ROM como apresentado na Figura 1, mais detalhes das hipóteses assumidas para estimativa dos resultados serão detalhadas nos próximos tópicos. A unidade funcional definida para estimar os indicadores dos fluxos de entrada e saída foi a produção de 1000 kg de carvão energético.

4.2 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

O inventário foi construído baseado nos dados primários fornecidos pela mineradora referentes a dois anos de operação, com uma produção média de 183500 ton/mês de carvão energético, operando 24 horas/dia, em três turnos de operação, de segunda a sexta-feira e em sábados alternados. Vale ressaltar a importância do trabalho pela utilização de dados primários, coletados a campo, pois sabe-se que esta prática é muito difícil de ocorrer devido a resistência praticada pelas empresas em ceder informações.

Nas Tabelas 4 e 5 são apresentados os indicadores do consumo de eletricidade e diesel para cada equipamento e etapa da mineração para produção de 1000 kg de carvão (unidade funcional). Na etapa de lavra ocorreu o maior consumo de energia, tanto para eletricidade quanto para o combustível, visto que já era esperado pelo grande número de operações para movimentação do carvão e do material inerte, processos característicos deste método.

As emissões dos GEE para elaboração do inventário foram estimadas por meio dos fatores de emissões relacionados com os fluxos de entrada e

saída de material e insumos do processo de mineração.

Tabela 4 – Consumo de eletricidade para produção de 1 000 kg de carvão

Etapa	Equipamento	Consumo por equipamento (kWh)	Consumo por etapa (kWh)
Cominuição	Britadores e peneiras	0,48	0,48
Lavra	Escavadeira Dragline	1,15	1,19
	Escavadeira Shovel P&H	0,04	

Tabela 5 – Consumo do combustível óleo diesel para produção de 1000 kg de carvão

Etapa	Equipamento	Consumo por equipamento (l óleo diesel)	Consumo por etapa (l óleo diesel)
Lavra	Perfuratriz	0,072	0,520
	Trator esteira	0,178	
	Pás carregadeiras	0,097	
	Escavadeira hidráulica	0,147	
	Motobomba	0,025	
Transporte do ROM	Caminhão – 30 t	0,058	0,415
	Caminhão – 65 t	0,357	

As emissões associadas ao consumo de óleo diesel pelas máquinas (inclui frota *off-road*) utilizadas nas etapas de lavra e transporte foram estimadas pelos fatores de emissão *default* para os gases CH₄, N₂O e CO₂ (Tabela 6) e pela equação 2, conforme a metodologia estabelecida pelo IPCC (2006a).

$$E_i = \sum_j (C_j \cdot f_{e_i}) \quad [\text{Eq. 2}]$$

Onde, E_i é a emissão do gás i (kg), C_j é o combustível fóssil j (TJ) e f_{e_i} é o fator de emissão do gás i do combustível fóssil j (kg/TJ).

Tabela 6 – Fatores de emissão do consumo de diesel pelas máquinas

GEE	Fator de emissão (kg/TJ óleo diesel)
CO ₂	74100
CH ₄	4,15
N ₂ O	28,6

Fonte: IPCC (2006a)

A detonação de explosivos promove a liberação de GEE, que depende da sua classificação e pode ser estimada utilizando o fatores de emissão da Tabela 7 na equação 1 (AGO, 2006).

Tabela 7 – Fatores de emissão de CO₂ da detonação de explosivos

Classificação do explosivo	Fator de emissão (kg/kg explosivo)
Emulsão	0,166

Fonte: AGO, 2006

Para determinar a quantidade de gases procedente do consumo de eletricidade, utilizou-se o fator de emissão da matriz de energia elétrica inserida no sistema interligado brasileiro sugerido por Miranda (2012), igual a 125 kg CO_{2eq}/MWh. Importante destacar a utilização deste indicador porque a matriz elétrica brasileira é predominantemente de fonte renovável, panorama que reflete em baixas emissões de GEE por eletricidade gerada, diferente dos indicadores estabelecidos pela maioria dos países europeus, asiáticos e norte americano, cuja matriz elétrica é majoritariamente de fonte fóssil. Segundo Restrepo

(2015), os indicadores utilizados nos estudos de ACV de mineração na Austrália e Polônia correspondem a 531 kg de CO_{2eq}/MWh, e na china a 1180 kg CO_{2eq}/MWh.

Além das emissões procedentes do consumo de energia, também precisam ser contabilizadas as emissões dos GEE da mineração propriamente dita, denominadas emissões fugitivas. Os processos geológicos de formação do carvão produzem CH₄, que fica armazenado nos leitos do minério e é desprendido durante a lavra da mina e nas etapas posteriores de processamento. A quantidade liberada de metano depende de vários parâmetros, mas principalmente da qualidade (*rank*) do carvão, da profundidade do leito e do método de mineração empregado (IPCC, 2006b). Emissões de CO₂ ainda podem ocorrer pela oxidação instantânea do carvão na atmosfera, mas essas emissões são muito baixas, especialmente pelas ações de recuperação da área minerada simultaneamente com a lavra, que envolve a cobertura e, posteriormente, a vegetação, diminuindo, assim, o fluxo de oxigênio.

O IPCC (2006) recomenda 3 abordagens para estimar as emissões de CH₄ das minas de carvão, com diferentes níveis de detalhes e disponibilidade de dados. A abordagem *Tier 1* apresenta intervalos de valores para os fatores de emissão conforme o método de mineração (céu aberto ou subterrâneas); a *Tier 2* é baseada em fatores de emissão específicos das jazidas e tipo de carvão e a *Tier 3* envolve um método específico de medição por mina. Nas duas primeiras abordagens utilizam-se a equação 3.

$$E_{CH_4} = Q \cdot f_e \cdot f_c \quad [\text{Eq. 3}]$$

Onde, E_{CH_4} é a emissão de CH₄ (kg), Q é a produção de carvão mineral (t), f_e é o fator de emissão (m³ CH₄/t carvão) e f_c é o fator de conversão (kg CH₄/m³ CH₄). Pela indisponibilidade de fatores específico da mina em estudo, optou pela utilização do método *Tier 1*, que recomenda os fatores de emissões apresentados na Tabela 8. Neste trabalho, foram utilizados os valores médios como sugerido pelo IPCC (2006b) para minas com profundidades entre 25 e 50 m.

Tabela 8 - Fatores de emissão de CH₄

Fonte de emissão	Fator de emissão (m ³ /t carvão)
Mineração a céu aberto	1,2
Pós-mineração	0,1

Fonte: IPCC (2006b)

A combustão espontânea nas pilhas de carvão é reconhecida pelo IPCC (2006b) como fontes de emissões de CO₂. Entretanto, a entidade não sugere métodos de cálculo para estimar porque suas quantidades são insignificantes.

As emissões indiretas associadas a produção de óleo diesel, produção e utilização de fertilizantes, produção e utilização de calcário, fabricação dos equipamentos e dos explosivos e o transporte das suas unidades de fabricação até a unidade mineradora, não foram contabilizados, pois é necessário a avaliação de todo seu ciclo de vida. Estas serão calculadas nas próximas etapas no trabalho com dados secundários do banco de dados de ACV.

Na Tabela 9 é apresentado um resumo do inventário do sistema estudado. Para o cálculo dos indicadores, as propriedades do diesel utilizadas foram o poder calorífico inferior igual a 41,8 MJ/kg e a massa específica igual a 0,85 kg/l, para o metano foi utilizada apenas a massa específica correspondente a 0,654 kg/m³.

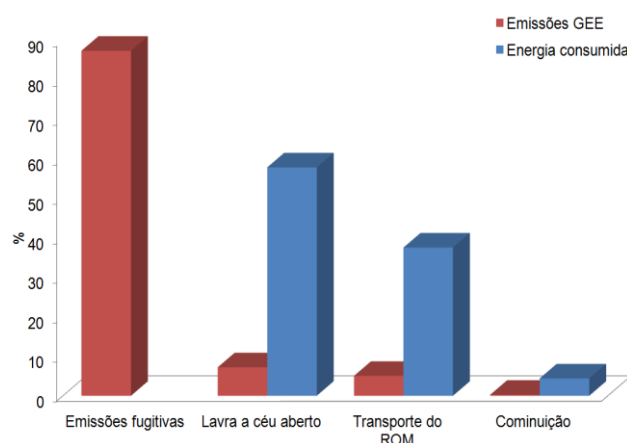
4.3 AVALIAÇÃO E INTERPRETAÇÃO

A seguir são apresentados os resultados obtidos a partir das metodologias de cálculo definidas na seção anterior. Na análise dos resultados do consumo de energia apresentado na Figura 2 nota-se que a etapa de lavra é responsável por consumir a maior quantidade energia, cerca de 58% do total, ocasionado pelo grande número de operações realizadas pelas máquinas alimentadas por óleo diesel ($1,84 \times 10^{-2}$ MJ/kg carvão) e eletricidade ($4,28 \times 10^{-3}$ MJ/kg carvão), como havia sido comentado na seção anterior. Em seguida, aparece a etapa de transporte com 37,6 %, cuja alimentação de energia foi 100% de óleo diesel ($1,47 \times 10^{-2}$ MJ/kg carvão) e, por outro lado, a etapa

de cominuição com 4,4%, abastecida com 100% de eletricidade ($1,73 \times 10^{-3}$ MJ/kg carvão).

Tabela 9 - Inventário da mineração do carvão a céu aberto para produção de 1000 kg de carvão

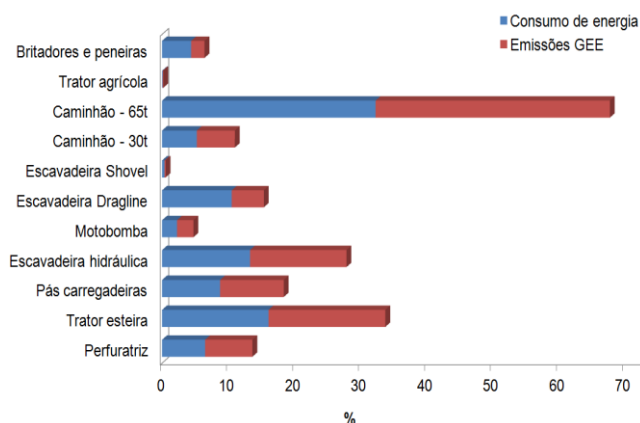
Entrada	Indicador	Unidade
Carvão ROM	1,000	t
Eletricidade	1,67	kWh
Explosivos	0,46	kg
Diesel ²	0,800	kg
Área minerada	$1,81 \times 10^{-5}$	ha
Saída		
CH ₄ mineração ¹	0,799	kg
CH ₄ pós-mineração ¹	0,067	kg
CH ₄ off-road ²	0,00014	kg
CO ₂ off-road ²	2,464	kg
CO ₂ explosivos	0,0764	kg
N ₂ O off-road*	0,0009	kg
CO _{2eq} eletricidade	0,149	kg

Figura 2 – Distribuição do consumo de energia e emissões de CO_{2eq} na mineração do carvão


Ainda avaliando os dados da Figura 2, verifica-se que a principal fonte de emissões dos GEE da mineração, considerando o escopo proposto neste trabalho, não está associada com o consumo de energia nos processos, mas com as emissões fugitivas, que foram responsáveis por 87,50 % do total (correspondendo a 0,0213 kg CO_{2eq}/kg carvão). Embora a emissão de CO₂ tenha sido maior em todo o ciclo (Figura 4), o alto valor do potencial de aquecimento global do metano (25 kg CO₂/kg CH₄) comparado com do CO₂ (1 kg CO₂/kg CO₂) proporcionou a maior contribuição pelas emissões fugitivas. Em estudos anteriores (Restrepo, 2015), realizados para mineração de carvão subterrânea no estado de Santa Catarina, as emissões fugitivas foram da ordem de 0,061 kg CO_{2eq}/kg carvão, indicador superior ao encontrado neste trabalho, provavelmente pela qualidade superior do carvão (betuminoso de alto volátil) e profundidade do leito, além do método de lavra empregado.

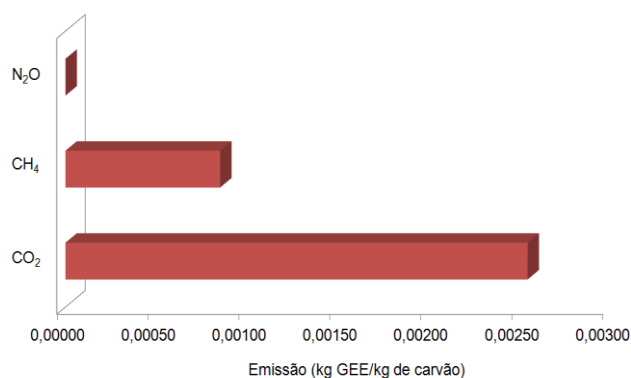
Na Figura 3 é ilustrado dados referentes ao consumo de energia das principais máquinas utilizadas em todo o sistema de mineração e suas respectivas emissões, observa-se que o caminhão – 65 t (fora de estrada) foi a máquina que consumiu mais energia (12,68 x 10⁻³ MJ/kg carvão) e, conseqüentemente, liberou a maior quantidade de GEE (1,05 x10⁻³ CO_{2eq}/kg carvão), ainda que não esteja alocado nas atividades de lavra, etapa responsável pelo maior consumo de energia e emissões em relação as fontes operacionais (Figura 2).

Figura 3 – Consumo de energia nas máquinas e suas respectivas emissões



Na Figura 4 é apresentada a quantidade dos principais GEE liberados durante o processo de mineração. Percebe-se que o CO₂ é, de longe, o gás liberado em maior quantidade, resultado, em sua maior parte, da combustão do óleo diesel nas máquinas *off-road* e da explosão da dinamite. Por outro lado, em relação ao metano, a mineração propriamente dita foi a responsável pela grande quantidade de gás liberado, promovida pelas emissões fugitivas enquanto a mina encontra-se exposta à atmosfera e nas etapas posteriores de segregação do carvão.

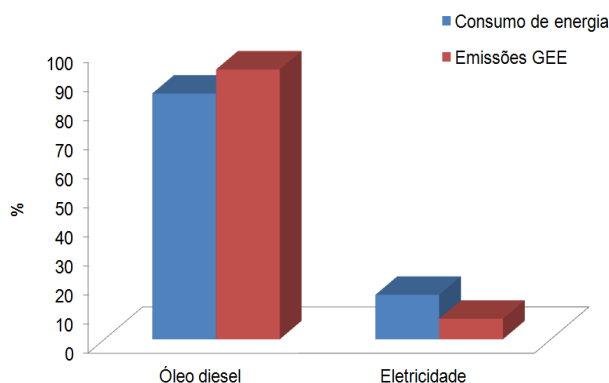
Figura 4 – Emissões de GEE na mineração do carvão



A distribuição do consumo de energia e das suas respectivas emissões em todo o sistema estudado é ilustrado na Figura 5. O consumo de energia elétrica foi menor devido ao pequeno número de máquinas utilizadas que demandavam por essa fonte. Em relação às emissões de GEE, era esperado os menores valores para fonte de energia elétrica pela sua procedência renovável, visto que o indicador de emissões em função do consumo de energia é igual a 0,0347 kg CO_{2eq}/MJ e para o óleo diesel é igual a 0,0828 kg CO_{2eq} /MJ, cerca de duas vezes menor, considerando o escopo proposto neste estudo.

As emissões totais de GEE pelo sistema proposto foram iguais a 2,43 x 10⁻² CO_{2eq}/kg carvão, valor muito inferior ao encontrado no estudo realizado por Restrepo et al. (2015) para minas subterrâneas, igual a 8,56 x 10⁻² kg CO_{2eq}/kg carvão. Uma das prováveis razões para a divergência pode ser o uso do indicador de consumo de energia elétrica superior, igual a 224 kg CO_{2eq}/MWh, além das altas emissões fugitivas e o consumo elevado de energia, explosivo e eletricidade.

Figura 5 – Distribuição do consumo de energia e das suas respectivas emissões



5 CONCLUSÃO

Um estudo de avaliação de ciclo de vida foi realizado com o carvão mineral utilizado para geração de energia elétrica no Brasil. O escopo do trabalho considerou as etapas de lavra a céu aberto, transporte do ROM e cominuição. O inventário foi realizado utilizando dados sobre consumo de energia, insumos e equipamentos coletados a campo, fato que justifica a importante contribuição do trabalho principalmente pela ausência de informações sobre inventário do carvão extraído por este método de mineração.

Os resultados mostraram que a fonte que mais contribui para o aquecimento global não é proveniente do consumo de energia ou insumos, mas proveniente das emissões fugitivas que corresponderam a 87,5% do total, resultado das altas emissões de metano das camadas de carvão e nas operações posteriores de fragmentação.

No que diz respeito ao consumo de energia, a etapa de lavra foi responsável por consumir 58% do total, consequência do grande número de operações realizadas pelas máquinas alimentadas por óleo diesel e eletricidade, em contra partida, o equipamento que consumiu a maior quantidade de energia – caminhão fora de estrada – está designado na etapa de transporte.

As emissões estimas do ciclo de vida avaliado foi igual a $2,43 \times 10^{-2}$ CO_{2eq}/kg carvão, valor três vezes inferior a estudo semelhante realizado no Brasil para minas subterrâneas.

Os resultados apresentados neste trabalho podem orientar as mineradoras para implantar ações mitigadoras e sistemas de eficiência energética a fim de reduzir o impacto ambiental,

embora a principalmente responsável, considerando o escopo analisado, seja oriunda de uma fonte pouco controlável (emissões fugitivas), cenário que ainda deve ser avaliado nos próximos estudos.

6 REFERÊNCIAS

ABOARRAGE, A. M.; LOPES, R. C. Projeto a Borda Leste da Bacia do Paraná: Integração Geológica e Avaliação Econômica: Relatório Final. Departamento Nacional de Produção Mineral. Ministério de Minas e Energia Porto Alegre, DNPM/CPRM. v1, 15 p, 1986.

AGO. Australian greenhouse office. Department of the Environment and Heritage -. Factors and methods workbook for use in Australian greenhouse emissions reporting. Canberra, Australia, 2006.

ATILGAN, B.; AZAPAGIC, A. Life cycle environmental impacts of electricity from fossil fuels in Turkey. Journal of Cleaner Production, 106, 555-564, 2015.

BABBITT, C. W.; LINDNER, A. S. A life cycle inventory of coal used for electricity production in Florida. Journal of Cleaner Production, 13 (9), 903 – 912, 2005.

BURMISTRZ, P.; CHMIELNIAK, T.; CZEPIRSKI, L.; GAZDA-GRZYWACZ, M. Carbon footprint of the hydrogen production process utilizing subbituminous coal and lignite gasification. Journal of Cleaner Production. 139, 858-865, 2016.

EPE. Empresa de Pesquisas Energética. Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear. Ministério de Minas e Energia. EPE: Rio de Janeiro, 2016.

GAVRONSKI, J. D. Mina de Candiota – alternativas de produção. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

IEA. International Energy Agency. EXCERPT FROM ELECTRICITY INFORMATION (2015 edition). 2015. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Electricitytrends.pdf>. Acesso em: 10 de abril de 2017.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Chapter 3: Mobile Combustion. V. 2: Energy, 2006a.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Chapter 4: Fugitive Emission. v. 2: Energy, 2006b.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. The Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report, Cambridge University Press, New York, US. 2007.

ISO 14040. International Organization for Standardization 14040:2006. Gestão Ambiental. Avaliação do ciclo de vida – Princípios e enquadramento. Norma Portuguesa, 2006a.

ISO 14044. International Organization for Standardization 14044:2006. Gestão Ambiental. Avaliação do ciclo de vida – Princípios e enquadramento. Norma Portuguesa, 2006b.

KALKREUTH, W.; HOLZ, M.; KERN, M.; MACHADO, G.; MEXIAS, A.; SILVA, M. B.; WILLETT, J.; FINKELMAN, R.; BURGER, H. Petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: Santa Terezinha, Leão-Butiá and Candiota Coalfields, Rio Grande do Sul, Brazil. International Journal of Coal Geology, 68, 79–116, 2006.

MIRANDA, M. M. Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida. Curso de Pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

RESTREPO, A.; BAZZO, E.; MIYAKE, R. A life cycle assessment of the Brazilian coal used for electric power generation. Journal of Cleaner Production, 92, 179-186, 2015.

SILVA, R.; PIRES, M.; AZEVEDO, C. M. N.; FAGUNDES, L. Monitoring light hydrocarbons in brazilian coal mines and in confined coal samples. International Journal of Coal Geology, v. 84, p. 269-275, 2010.

SOARES, P. S. M.; SANTOS, M. D. C.; POSSA, M. V. Carvão brasileiro: tecnologia e meio Ambiente. Centro de Tecnologia Mineral. Ministério de Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, 2008.

SPATH, P. L.; MANN, M. K.; KERR, D. R. Life Cycle Assessment of Coal-fired Power Production. National Renewable Energy Laboratory - U.S. Department of Energy Laboratory, Golden, 1999.

WCA. World Coal Association. Disponível em: <https://www.worldcoal.org/coal/what-coal>. Acessado em: 10 de abril de 2017.

XIAOYE, L.; ZHIHUA, W.; ZHIJUN, Z.; ZHENYU, H.; JUNHU, Z.; KEFA, C. Up-to-date life cycle assessment and comparison study of clean coal power generation technologies in China. Journal of Cleaner Production, 39, 24-31, 2013.