

Utilizando o modelo BALANCE-ENPEP para realizar o balanço entre a oferta e a demanda de energia num setor industrial: estudo da indústria de cimento no estado de Minas Gerais

RESUMO

O cimento Portland é um dos materiais de construção mais importantes e altamente empregado pela humanidade. Sua alta participação no desenvolvimento humano, como material básico para qualquer tipo de construção, caracteriza a indústria cimenteira como um dos principais setores para o desenvolvimento econômico e social. No contexto energético do Estado de Minas Gerais, este setor representa aproximadamente 3% do consumo de energia. Para realizar este estudo, foi coletado um conjunto de informações de consumo de energia e dados do processo, além de indicadores econômicos. Minas Gerais abriga a maioria das fábricas de cimento instaladas no Brasil. Cada estágio de produção foi identificado e quantificado em relação ao consumo de energia. Inicialmente, a projeção do consumo final das principais fontes de energia foi desenvolvida com o método de crescimento médio. Em seguida, a demanda futura de energia foi calculada usando o modelo ENPEP-BALANCE, para um período de análise de 20 anos. Os resultados mostraram que a demanda final de energia desse setor no Estado de Minas Gerais pode variar de 1.475 a 2.642 mil tep, o que representa cerca de 34% mais ou menos 15% da demanda registrada do ano base. Por último, as emissões de CO₂ foram projetadas para os cenários considerados.

PALAVRAS-CHAVE: Indústria de Cimento. Planejamento Energético. Balanço entre a Oferta e Demanda de Energia. ENPEP.

Fernando Malaquias Costa
fernandomalaquias.energia@gmail.com
Universidade Federal de Minas Gerais -
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

Antonella Lombardi Costa
antonella@nuclear.ufmg.br
Universidade Federal de Minas Gerais -
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

Ricardo Brant Pinheiro
rbrantp@gmail.com
Universidade Federal de Minas Gerais -
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

INTRODUÇÃO

O cimento Portland é um dos mais importantes materiais de construção e um dos mais empregados pela humanidade. A sua alta participação no desenvolvimento humano, por ser matéria básica para qualquer tipo construção, caracteriza este subsetor industrial como um dos principais setores de desenvolvimento econômico e social.

Por ser um subsetor energointensivo e pela grande quantidade de unidades fabris localizadas no Estado de Minas Gerais, o estado brasileiro com o maior número de fábricas instaladas, a indústria cimenteira possui uma relevância no consumo energético estadual, representando cerca de 4%.

Portanto, é de considerável importância análises que têm por objetivo o desenvolvimento de previsões do comportamento da oferta e demanda de energia do setor no médio e longo prazos, de forma a prever quais recursos energéticos e tecnologias serão utilizados ao longo do tempo e quais serão os respectivos custos. O conhecimento destas informações permitirá às empresas garantir o atendimento da demanda por energia de forma sustentável e permitir a sua competitividade no mercado. Além disso, estas informações subsidiarão o desenvolvimento de políticas e tecnologias cujo objetivo é o aumento da eficiência da utilização da energia na unidade fabril e/ou no grupo econômico.

A INDÚSTRIA CIMENTEIRA

No Brasil estão instaladas 100 fábricas com capacidade total produtiva de 100 milhões t/ano [1]. Minas Gerais é o estado o qual apresenta a maior concentração de fábricas instaladas, sendo 15 no total.

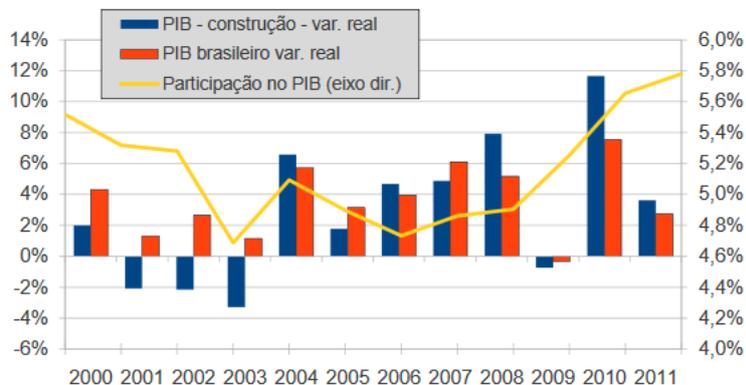
O cimento, de forma resumida, é produzido por meio da extração do calcário, processos termoquímicos e da mistura com outros materiais (gesso e outros). Apesar de diferentes processos de fabricação do cimento, neste trabalho somente foi focado o processo de via seca em razão de sua eficiência energética e por se tratar do processo de produção mais praticado na atualidade.

ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS DA INDÚSTRIA BRASILEIRA DE CIMENTO

O desempenho deste setor industrial é um bom indicador econômico de um país. Além do consumo de cimento estar ligado de forma direta à renda per capita, ele também implica em mudanças futuras no desenvolvimento de uma região ou de um país a depender de vários fatores por exemplo: a demanda gerada pela construção civil, as reservas de matérias-primas, o acesso ao mercado e as condições econômicas de cada região.

O cimento é um material essencial na construção civil, portanto o desempenho econômico deste setor relaciona-se ao desempenho da construção civil e este ao crescimento do PIB nacional, conforme é apresentado na Figura.1.

Figura 1. Crescimento do PIB brasileiro x Valor adicionado da construção civil [2]



Apesar desta expressiva participação, o Brasil apresenta um consumo per capita de cimento menor que a média mundial. Considera-se que o brasileiro consome cerca de 413 kg/ano de cimento enquanto a média mundial é de 575 kg/ano [3].

Figura 2. Consumo aparente do cimento no Brasil (milhões de tonelada) [4]



Além do baixo consumo per capita, pode-se citar também que o Brasil possui um elevado déficit habitacional, em torno de 6,3 milhões de domicílios [2], e carece de investimentos em infraestrutura, tais quais: portos, aeroportos, estradas, eletricidade e saneamento. Conclui-se então que este setor deverá expandir no Brasil.

Outra informação de impacto social é a grande geração de empregos que este setor produz. Cerca de 25.000 trabalhadores são empregados de forma direta por este setor; o estado de Minas Gerais é o maior produtor do país e o maior empregador da indústria cimenteira. [1].

Em relação aos aspectos ambientais da indústria cimenteira, a geração de resíduos e efluentes gasosos constitui um dos principais problemas. A redução de custos de produção relacionados à energia e leis ambientais levou a indústria a incinerar resíduos industriais em fornos (coincineração), substituindo, desta forma, parte dos combustíveis convencionais.

Há, na indústria de cimento, um elevado potencial poluidor, dependendo do combustível utilizado, em especial pela emissão de poluentes atmosféricos compostos de material particulado, óxidos de nitrogênio e de enxofre, compostos orgânicos voláteis, ácidos halogenados, metais pesados, dioxinas e outros [5].

Neste segmento industrial, o CO₂ é o que mais contribui para as emissões de gases de efeito estufa, com mais de 99% do total. Outros gases, como óxidos de nitrogênio, metano e monóxido de carbono, apresentam uma participação marginal.

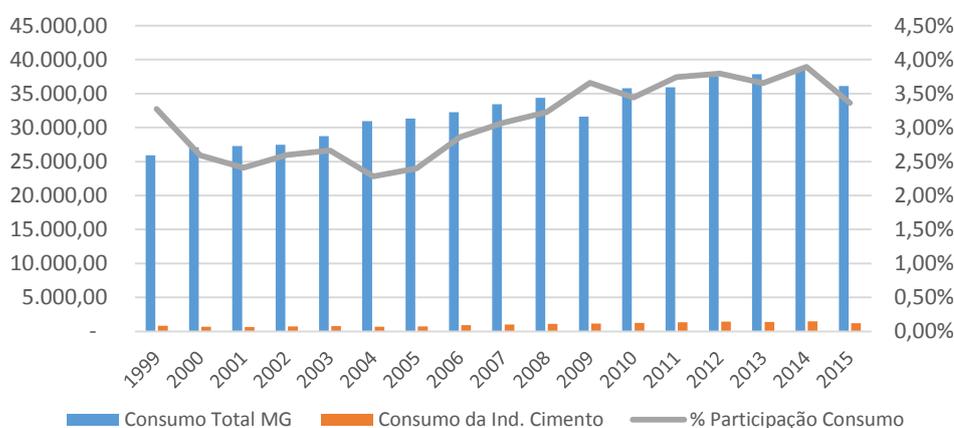
É estimado que a produção mundial de cimento seja responsável por 5% das emissões globais de CO₂. A fabricação de uma tonelada de cimento libera aproximadamente 0,8 toneladas de CO₂ para a atmosfera, a depender da intensidade elétrica e dos recursos energéticos utilizados nos processos térmicos da produção [6].

A coincineração em algumas plantas cimenteiras tem ocorrido com a utilização de diversos tipos de resíduos e em proporções importantes de substituição de combustíveis. A grande variedade de resíduos processados está ligada à área territorial e à época considerada, destacando-se o bagaço de cana, casca de arroz, casca de coco, resíduos de madeira, moinha de carvão vegetal, lenha, alcatrões, coque de petróleo, moinha de coque, rejeitos carbonosos, turfa, pneus e outros. Dar-se-á uma atenção ao coque de petróleo, por seu expressivo consumo nos últimos anos no setor de cimento.

O USO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA DO CIMENTO EM MINAS GERAIS

A notável representatividade do setor no consumo energético no estado é apresentada na Figura 3.

Figura 3. Consumo Energético do setor Cimento em Minas Gerais (mil tep). Adaptado de [7]



Considerando as etapas produtivas com representatividade no consumo de energia, pode-se dividir a produção do cimento nas seguintes etapas:

- Preparação das Matérias Primas;
- Preparação e Moagem do Cru;
- Homogeneização e Queima (produção do clínquer);
- Moagem de Cimento e Acabamento;
- Serviços Auxiliares e Iluminação.

De forma sucinta, pode-se considerar o uso final de energia em dois objetivos: produção de calor e acionamento de motores processos como moagem, britagem, rotação do forno, iluminação etc. Na Tabela 1 é apresentada a utilização da eletricidade destes macroprocessos [8].

Tabela 1. Consumo de energia elétrica total na fábrica [8]

Etapas de Consumo	tep/t	%
Preparação das Matérias Primas	0,0004	3
Preparação e Moagem do Cru	0,0039	32
Homogeneização e Queima	0,0026	21
Moagem de Cimento e Acabamento	0,0051	41
Serviços Gerais, Auxiliares e Iluminação	0,0003	3
TOTAL	0,0123	100

Na Tabela 2 é apresentada a variedade na utilização de diferentes combustíveis na indústria cimenteira de Minas Gerais, no período de 2001 a 2015. O consumo específico de energia por produção de cimento ao longo do período em estudo é apresentado na Tabela 3.

Tabela 2. Utilização de combustíveis na industrial do Cimento em Minas Gerais (mil tep) [7]

Fonte de energia	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Média	%
Gás natural	8	6	8	9	7	6	10	16	6	5	5	8	1,00%
Carvão Mineral	11	25	72	35	65	15	17	8	9	11	1	20	1,50%
Lenha	0	0	0	0	0	0	0	38	11	7	13	5	0,00%
Óleo diesel	0	0	1	1	1	2	1	4	5	5	5	2	0,00%
Óleo combustível	12	19	16	12	11	11	5	4	3	4	4	25	1,50%
Eletricidade	100	116	137	161	157	171	182	188	197	203	179	143	14,00%
Carvão vegetal	185	217	177	245	197	212	269	335	325	307	179	214	21,00%
Coque de Petróleo	369	472	560	587	644	739	693	672	782	909	774	581	56,00%
Outros	64	67	55	58	75	75	57	60	46	44	55	49	5,00%
TOTAL	749	922	1.026	1.108	1.157	1.231	1.234	1.325	1.384	1.495	1.215	1.046	100,00%

Tabela 3. Consumo específico de combustível por produção de cimento em MG (mil tep) [7, 8]

Descrição	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Média
Produção Cimento (10 ⁶ t)	9.152	10.027	10.849	12.654	12.979	14.078	14.803	15.357	14.629	14.716	13.172	12.947
Consumo Energético (mil tep)	749	922	1.026	1.108	1.157	1.231	1.234	1.325	1.384	1.495	1.215	1.168
Consumo Específico (tep/t)	0,082	0,092	0,095	0,088	0,089	0,087	0,083	0,086	0,095	0,102	0,092	0,090

Considerando o percentual de participação médio dos principais combustíveis utilizados no Estado (Tabela 2) e o consumo específico (Tabela 3),

calcula-se o consumo dos combustíveis por tonelada de cimento produzido. Este resultado é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Consumo médio de combustível por tonelada de cimento produzido em MG

Fonte de energia	tep/t
Gás natural	0,0007
Carvão Mineral	0,0017
Lenha	0,0004
Óleo diesel	0,0001
Óleo combustível	0,0021
Eletricidade	0,0123
Carvão vegetal	0,0185
Coque de Petróleo	0,0500
Outros	0,0042
Total	0,0900

Portanto, para cada tonelada produzida de cimento em Minas Gerais, é necessário o fornecimento de 0,0777 tep de calor e 0,0123 tep de eletricidade.

Os principais equipamentos utilizados na conversão energética das etapas de produção com as respectivas eficiências de conversão são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Eficiências de processos [8, 9]

Etapas de Consumo	Equipamentos	Eficiência (n)	Conversão
Preparação das Matérias Primas	Britador	5%	tep / tonelada de calcário britado
Preparação e Moagem do Cru	Moinho de Bolas (A)	8%	tep / tonelada de calcário moído
Homogeneização e Queima	Motor Elétrico	98%	Energia elétrica em energia mecânica (rotação do forno)
	Forno	51%	tep / tonelada de clínquer
Moagem de Cimento e Acabamento	Moinho de Bolas (B)	10%	MWh / tonelada de clínquer moído

No Brasil, a automação dos processos ainda é baixa quando comparado à média internacional. Investe-se pouco em tecnologia de controle ambiental e melhorias na eficiência operacional. A indústria de cimento possui um enorme potencial técnico global de economia de energia – de 28 a 33%, que deve se materializar em longo prazo (2050) [10]. Segunda a Confederação Nacional da Indústria:

[...] a substituição de equipamentos (como fornos e moinhos) da indústria cimenteira nacional por modelos mais eficientes, disponíveis no mercado, acarretaria uma economia de 8,7% no consumo energético total desta indústria [...] 89,3% desta economia seriam no uso final “aquecimento direto” [11].

O PLANEJAMENTO ENERGÉTICO EM SETORES INDUSTRIAIS

Dado que o consumo final de energia do setor industrial brasileiro representa cerca de 30% de toda energia consumida no país [6] e que este contribui com 21% do PIB brasileiro [12], o planejamento energético deste setor é de crucial importância para a manutenção e crescimento da economia. Além

disso, o avanço deste setor no PIB, tendo em contraponto a diminuição do consumo energético por produção elevaria a competitividade da indústria brasileira no contexto internacional.

A aplicação do planejamento energético nos setores industriais permite o desenvolvimento de políticas públicas e adoção de tecnologias que proporcionem o aumento da eficiência energética, diminuindo assim o custo de produção. Ademais, será permitido realizar previsões do comportamento da oferta e da demanda energética, prevendo, desta forma, quais recursos energéticos serão utilizados ao longo do tempo, e suas quantidades, de modo a permitir a criação de estratégias de suprimentos.

MODELOS UTILIZADOS PARA PLANEJAMENTO ENERGÉTICO

Um dos pontos que norteará a realização do planejamento energético é o conhecimento da demanda futura de energia. Diversos métodos podem ser usados nas projeções da demanda. Dentre estes, cita-se dois métodos que são utilizados pelas maiorias das agências de planejamento: modelos econométricos ou modelos de usos-finais [13].

Os modelos econométricos são utilizados para se estudar uma classe completa e homogênea de consumidores e não levam em conta a estrutura tecnológica utilizada nos processos de conversão energética, e nem o uso final da energia. Estes modelos são válidos para se compreender a natureza agregada da demanda de energia e dois de seus determinantes – preço e renda.

Nos modelos de uso-final é necessário classificar as diferentes atividades que compõe a demanda de energia em categorias homogêneas quanto às atividades econômicas e usos finais. Estes modelos são detalhados, embora a modelagem matemática seja simples, e se ajuste bem aos propósitos de projeções de eficiência energética porque é possível considerar as mudanças nos níveis de serviços e de tecnologias.

A utilização dos modelos de Uso Final requer dados detalhados e inclusive um estudo do estado da arte das tecnologias utilizadas e as tendências de ganhos de eficiências futuras. Para realizar este tipo de análise, pode-se adotar dois tipos diferentes de metodologias: *Top-Down*, onde é utilizado modelos de equilíbrio geral (balanço entre oferta e demanda); e *Bottom-Up*, onde a análise é desagregada das diversas classes de consumo, descrevendo de maneira quantitativa a estrutura tecnológica da conversão e do uso da energia.

O MODELO ENPEP

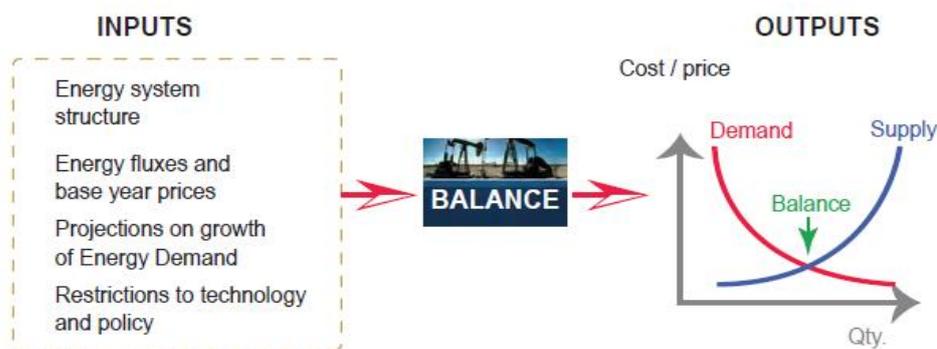
O modelo ENPEP é uma ferramenta que é capaz de utilizar cenários para a realização da análise integrada e o balanço entre a oferta e a demanda de energia. Este modelo foi desenvolvido pelo *Laboratório Nacional de Argonne* (ANL) com o apoio do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) e a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA).

O módulo BALANCE do ENPEP é classificado como um modelo de simulação não linear baseado equilíbrio de mercado (*Top-Down*), cujo objetivo é determinar

a resposta de vários segmentos do sistema de energia a mudanças nos preços da energia e nos níveis de demanda.

Os parâmetros de entrada incluem informações da estrutura do sistema energético; estatísticas de energia do ano base; níveis de consumo e produção; preços; crescimento da demanda de energia; e impactos ambientais.

Figura 4 - Principais entradas e saídas do ENPEP-BALANCE [14]



Neste processo, uma rede de energia é projetada para rastrear o fluxo de energia de fontes primárias até a demanda de energia útil (uso final) e deverá conter as informações sobre a produção, conversão, transporte, distribuição e a utilização da energia nas atividades do sistema estudado, bem como o fluxo de energia e de combustíveis pertencentes a tais atividades. Um exemplo desta rede é apresentado por meio da Figura 6.

O modelo usa um algoritmo de compartilhamento de mercado para estimar a penetração de diferentes alternativas de suprimento energético. O usuário define as restrições como, por exemplo, limites de capacidade (onde é possível considerar critérios de capacidade máxima de investimento ou capacidade da cadeia industrial), políticas governamentais (taxas, subsídios, recursos prioritários para produtos nacionais com recursos importados, etc.), preferências dos consumidores, e a capacidade do mercado para responder aos sinais de preços ao longo do tempo.

ENPEP-BALANCE encontra de forma simultânea a interseção de curvas de oferta e demanda de todas as formas de fornecimento de energia e de todos os usos da energia, incluindo a rede energética. O equilíbrio é alcançado quando o modelo encontra um conjunto de preços que traz o mercado ao equilíbrio e quantidades que satisfazem todas as equações e desigualdades estabelecidas.

O modelo usa a técnica iterativa de Jacobi para encontrar uma solução que cai dentro da tolerância definida pelo usuário. De forma simultânea, com os cálculos de energia, o modelo calcula os resíduos ambientais associados à energia fornecida na configuração do sistema, como gases de efeito estufa, contaminantes atmosféricos convencionais, materiais particulados, óxidos de enxofre (SOX), óxidos de nitrogênio (NOX), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), compostos orgânicos voláteis, chumbo, etc.

Estes cálculos podem ser estendidos à geração de contaminação por resíduos, em água e terra. As emissões de gases de efeito estufa podem ser relatados em um formato compatível com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas [15].

O modelo ENPEP-BALANCE é uma ferramenta de fácil utilização, além dos pontos citados por Jonusan [16]:

“a) Utilização: o ENPEP é utilizado em mais de 50 países, além de já ter sido utilizado no estudo de planejamento energético para o Estado de Minas Gerais em 1995/1996;

b) Custo: o ENPEP é gratuito;

c) Treinamento: o modelo é de fácil utilização, requerendo aproximadamente uma semana de treinamento para aplicações básicas ou duas semanas para aplicações avançadas. “

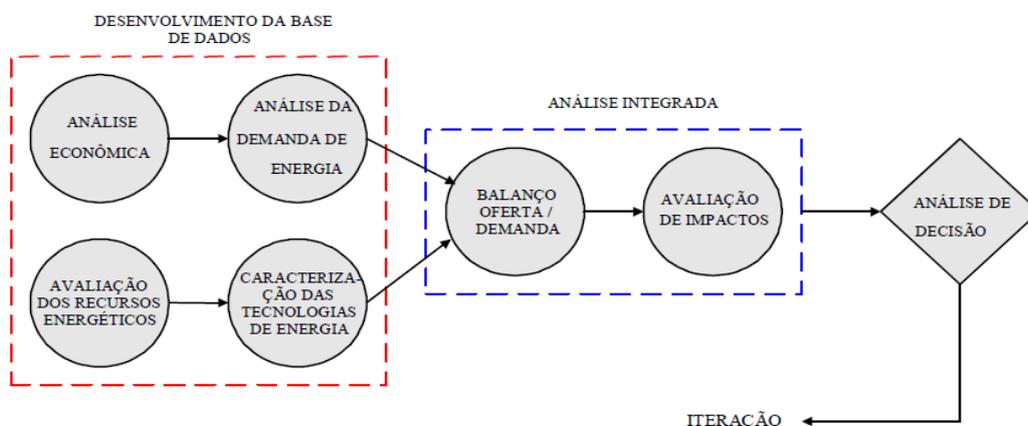
METODOLOGIA

No presente trabalho foi adotada a metodologia proposta pela IAEA [15] onde o planejamento energético se dá pela realização das seguintes etapas:

- I. Definir as metas e objetivos gerais do plano;
- II. Determinar a abordagem a ser tomada;
- III. Identificar as informações necessárias;
- IV. Escolher e realizar o processo de análise;
- V. Apresentar resultados; e
- VI. Executar o plano de energia.

O estudo realizado foi de longo prazo entre os anos de 2015 a 2035. O ano base escolhido para o estudo foi o de 2015, por conter os dados recentes e confiáveis necessários para a elaboração do estudo. Para calcular realizar o balanço entre a oferta e a demanda de energia futura do setor em Minas Gerais, foi utilizado o modelo BALANCE-ENPEP, levando em consideração diferentes cenários econômicos e tecnológicos. A Figura 5 ilustra a abordagem metodológica.

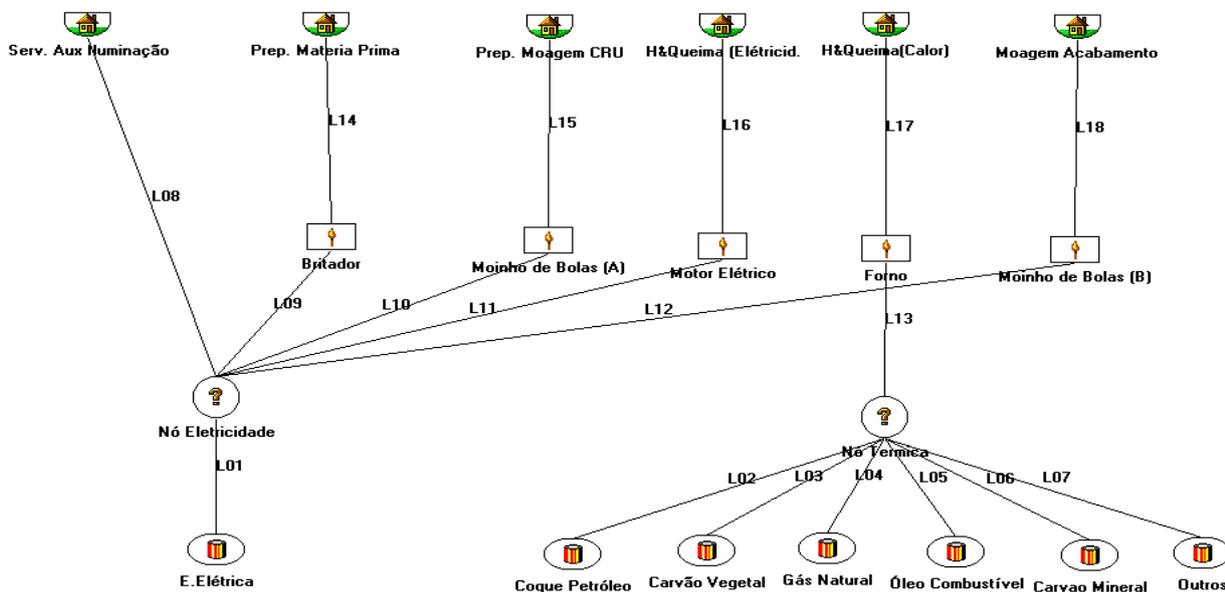
Figura 5. Abordagem metodológica do modelo BALANCE-ENPEP. Adaptado de [17]



Para construção do ano base, foram consideradas informações secundárias do setor, como balanços energéticos da EPE, da CEMIG, informações setoriais e indicadores econômicos. Foram identificados e quantificados os usos finais da

energia em cada estágio de produção e representados por meio de uma rede energética, vide exemplo na Figura 6.

Figura 6. Rede representativa do setor Industrial de cimento em Minas Gerais



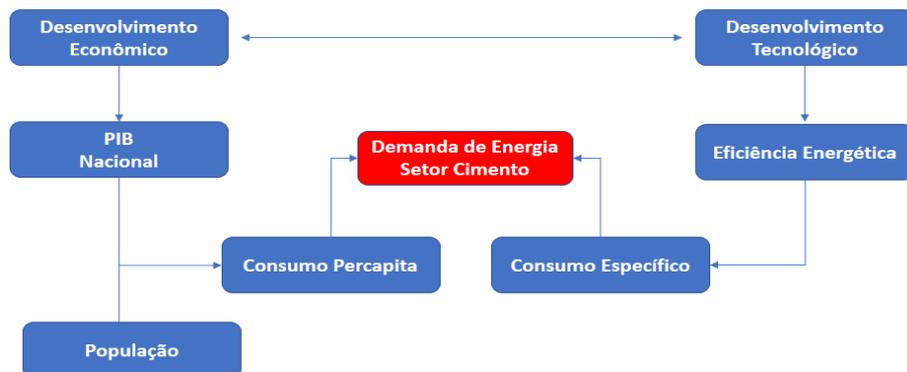
Os recursos utilizados por pela indústria de cimento em Minas Gerais e localizados na base da rede são: energia elétrica, coque de petróleo, carvão vegetal, gás natural, óleo combustível, carvão mineral e outros (coincineração de resíduos industriais).

Os processos de conversão de energia são: Britador, Moinho de Bolas (A), Motor Elétrico, Forno e Moinho de Bolas (B). As demandas de energia útil são: Serviços Auxiliares e Iluminação, Preparo da Matéria Prima, Preparo e Moagem do Cru, Homogeneização e Queima (eletricidade e calor) e Moagem e Acabamento do Cimento.

CENÁRIOS CONSIDERADOS

Considerando que o planejamento energético visa assegurar a continuidade do suprimento de energia num dado futuro, a análise da demanda de energia se torna o ponto focal do estudo. Para melhor compreender quais variáveis, e, a influência destas na demanda de energia no setor industrial do cimento em Minas Gerais foi desenvolvida uma Rede de Causalidade, apresentada na Figura 7.

Figura 7 – Rede de Causalidade resumida da demanda de energia no setor industrial do cimento



Sendo assim, a construção dos possíveis cenários da demanda de energia do setor industrial do cimento em Minas Gerais, será função das variáveis apresentadas na Figura 7, onde os eixos centrais serão o Desenvolvimento Econômico e o Desenvolvimento Tecnológico.

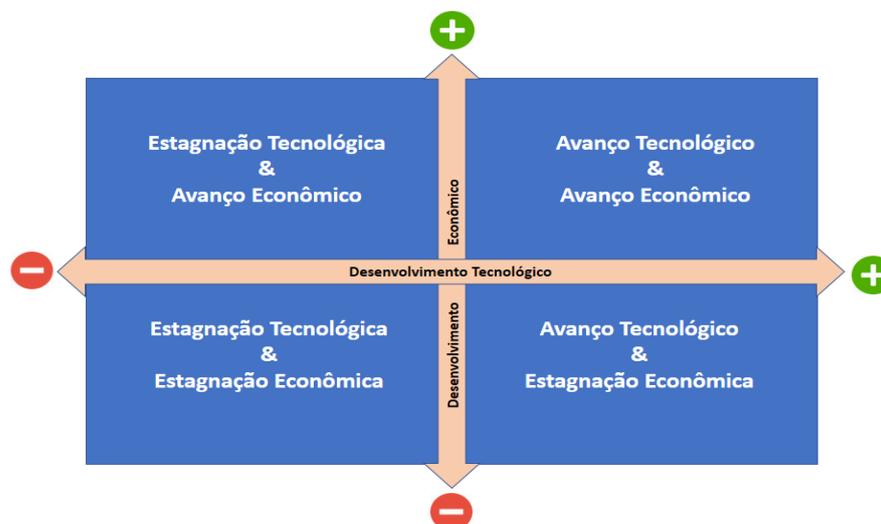
Para o eixo Desenvolvimento Econômico, além da variável de desempenho econômico, representada na Figura 7 pelo PIB Nacional, considerou-se a projeção realizada para a população do Estado de Minas Gerais [3]. A união destas variáveis resulta no indicador Consumo Anual per capita de Cimento (kg/hab./ano).

Havendo um desenvolvimento econômico, espera-se que o consumo brasileiro per capita de cimento cresça também atingindo em longo prazo a média observada nos países desenvolvidos, ou seja, passará de 413 para 596 kg/hab./ano [3]. Sendo este indicador uma síntese de duas variáveis importantes, será utilizado para construir os possíveis cenários do eixo Desenvolvimento Econômico.

Para o eixo Desenvolvimento Tecnológico, considerou-se o aumento da eficiência energética nos processos de produção. Como citado [10] é estimado que em longo prazo, até o ano de 2050, há um grande potencial técnico global de economia de energia – de 28 a 33%. Será considerado que o ganho na eficiência energética acontecerá nos processos térmicos da produção, ou seja, no forno.

Os cenários aqui propostos consideraram os avanços ou a estagnação (permanecer na mesma situação atual) dos eixos centrais. As demais variáveis que impactam na demanda de energia, como a oferta dos recursos energéticos, preços, configuração tecnológica e demais, serão consideradas tais quais os valores projetados [3]. Também será considerado que o Estado de Minas Gerais manterá a sua participação percentual na produção nacional, ou seja, 23%. Sendo assim, foram estabelecidos quatro cenários futuros representados pela Figura 8.

Figura 8 - Cenários Considerados



O Quadro 1 apresenta os valores numéricos das variáveis a serem consideradas para a elaboração dos quatro cenários.

Quadro 1 – Descrição dos Cenários Considerados

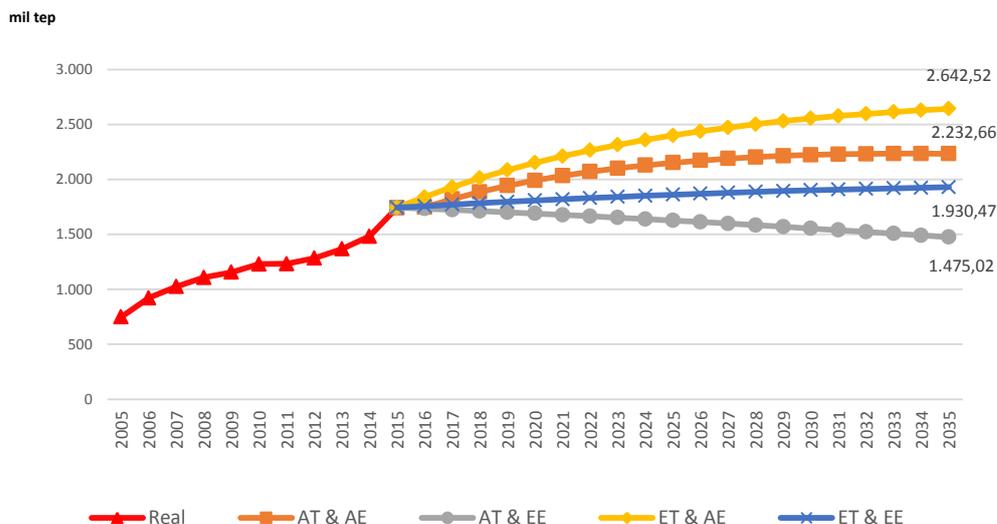
Cenários			Característica	
Id.	Sigla	Descrição	Desenvolvimento Econômico	Desenvolvimento Tecnológico
1	AT & AE	Avanço Tecnológico & Avanço Econômico	Aumento do consumo per capita de cimento atingindo (596 kg / hab./ ano) em 2035	Aumento de 30% na eficiência energética (redução do consumo específico)
2	AT & EE	Avanço Tecnológico & Estagnação Econômica	Manutenção do consumo per capita atual (413 kg / hab. / ano)	Aumento de 30% na eficiência energética (redução do consumo específico)
3	ET & AE	Estagnação Tecnológica & Avanço Econômico	Aumento do consumo per capita de cimento atingindo (596 kg / hab./ ano) em 2035	Nenhum aumento na eficiência energética (manutenção do consumo específico atual)
4	ET & EE	Estagnação Tecnológica & Estagnação Econômica	Manutenção do consumo per capita atual (413 kg / hab. / ano)	Nenhum aumento na eficiência energética (manutenção do consumo específico atual)

RESULTADOS

A entrada de dados e o balanço entre a oferta e a demanda de energia, no setor de cimento em Minas Gerais, foi realizado no ENPEP-BALANCE. A rede de energia é composta por 20 nós e interligada por 19 links [3].

Os resultados obtidos do processamento do BALANCE-ENPEP podem ser observados na Figura 9.

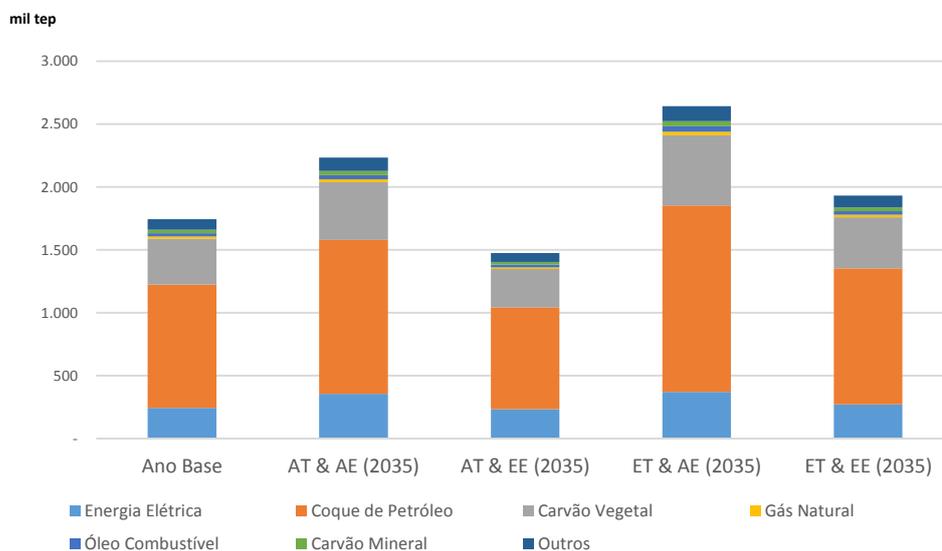
Figura 9. Projeção da Demanda de energia do setor industrial de cimento em MG



Dentre os cenários apresentados o de maior crescimento da demanda de energia é o caso 3, ET & AE, apresentando 52% de crescimento, e o cenário de decréscimo foi o caso 2, AT & EE, com 15% de decréscimo.

Estes cenários são apresentados de maneira detalhada na Figura 10. São identificadas as diferentes participações dos recursos energéticos utilizados no setor para os quatros cenários propostos.

Figura 10. Cenários detalhados por recursos energéticos no setor industrial de cimento em MG



Apesar da infinidade de possíveis cenários possíveis, os cenários apresentados representam os limites das ocorrências das possibilidades de demandas de energia deste setor industrial em MG ao longo do horizonte analisado.

Em todos os cenários nota-se a tendência da grande utilização do Coque de Petróleo (56%), do Carvão Vegetal (21%) e da Eletricidade (14%) como principais

recursos energéticos utilizados por esta indústria no Estado. Destes, o de maior criticidade é o Coque de Petróleo, dado a necessidade de importação e a sua precificação não ser regulada, sendo regida por meio da dinâmica entre a oferta e demanda do mercado.

As Figuras de 11 a 14 apresentam cada cenário de forma detalhada.

Figura 11 - Variações das participações dos recursos energéticos do Cenário AT & AE

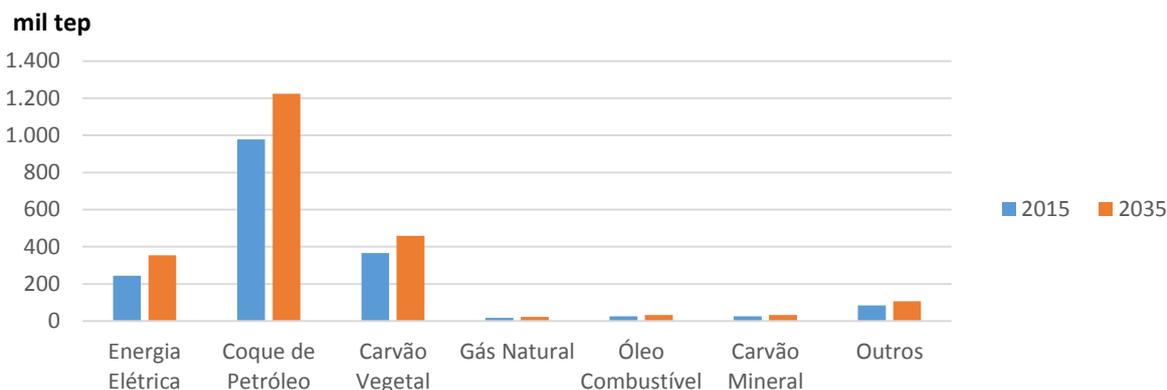


Figura 12 - Variações das participações dos recursos energéticos do Cenário AT & EE

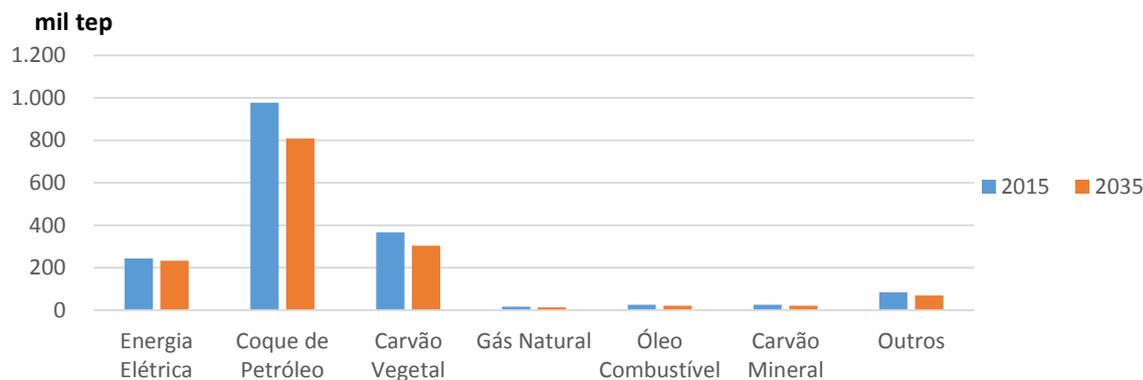


Figura 13- Variações das participações dos recursos energéticos do Cenário ET & AE

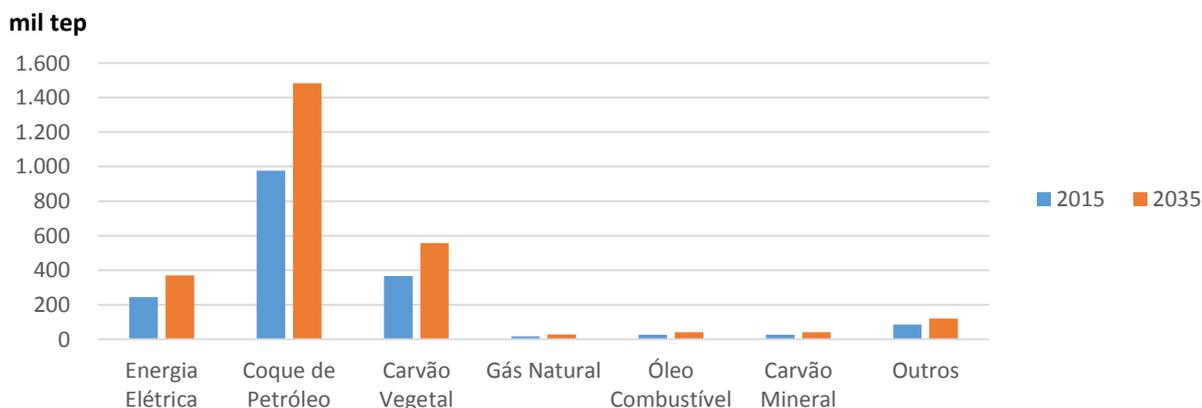
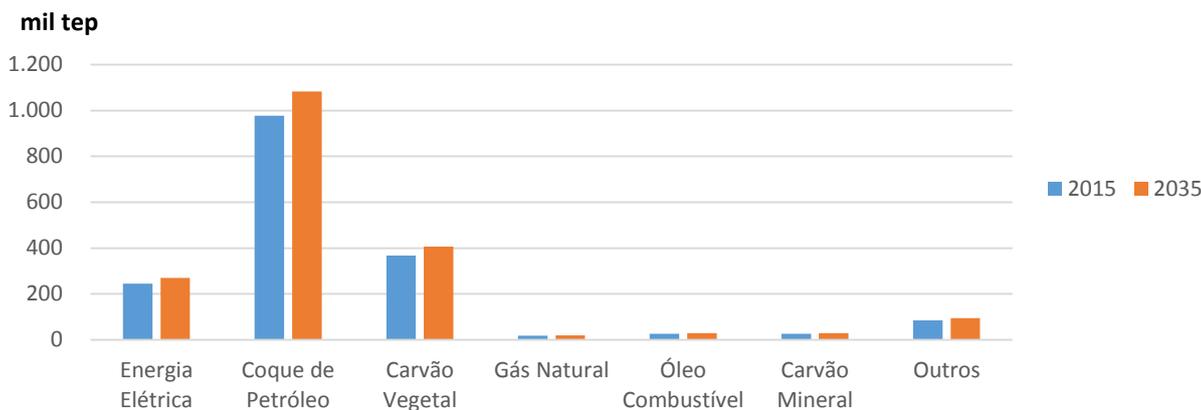


Figura 14 - Variações das participações dos recursos energéticos do Cenário ET & EE



As variações da participação dos recursos energéticos se devem às mudanças dos níveis de eficiência energética, dos preços da energia e pelos diferentes níveis de demanda para cada cenário.

AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS

O modelo ENPEP-BALANCE calcula as emissões por meio da multiplicação do consumo de combustível pelo fator de emissão correspondente para uma determinada tecnologia de conversão. Porém, devido à falta de dados sobre emissões específicas de poluentes, considerando as tecnologias de conversão energéticas e os combustíveis utilizados nesta indústria não foi possível realizar a análises de emissões utilizando o módulo do modelo ENPEP-BALANCE.

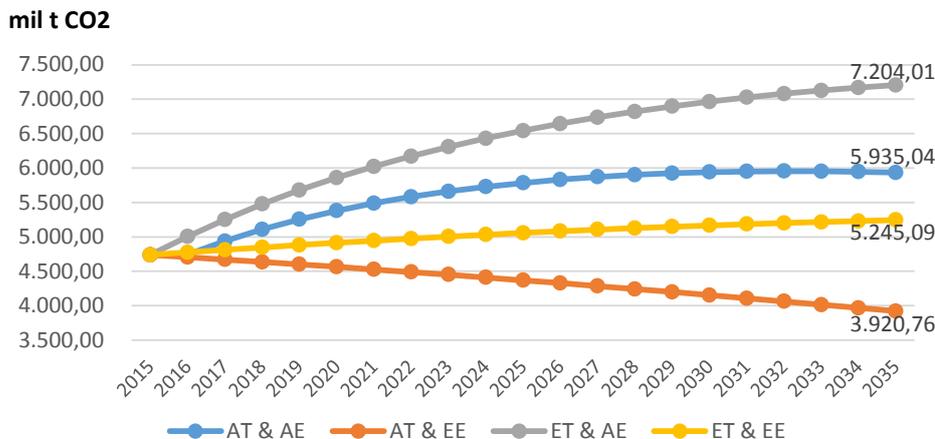
As emissões de CO₂ foram calculadas utilizando a metodologia *Top-Down*, que é reconhecida internacionalmente e recomendada pela ONU (Organizações das Nações Unidas) e é proposta pelo IPCC.

Considerando as simulações das emissões, realizadas por [18], foi calculado o fator de emissão de CO₂ para cada fonte [13]. Os valores são mostrados na Tabela 6 e foram usados para prever as emissões para os quatro cenários estudados, conforme é apresentado na Figura 15.

Tabela 6 - Fator de Emissão de CO₂ por fonte de energia para a indústria de cimento

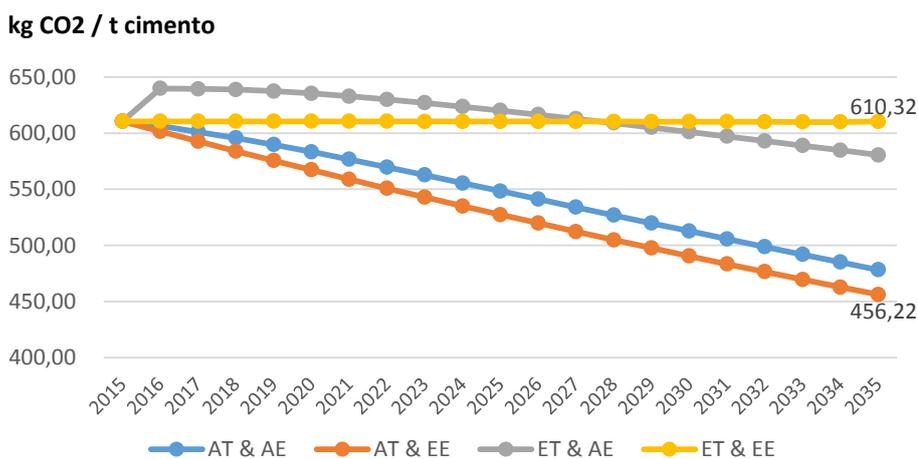
Recurso Energético	mil t CO ₂ / mil tep
Gás Natural	1,75392
Carvão Mineral	3,29073
Lenha	-
Óleo Diesel	2,53575
Óleo Combustível	2,59425
Eletricidade	-
Carvão Vegetal	3,29730
Coque de Petróleo	3,41954

Figura 15 -Projeção da emissão de CO2 para cada cenário



A partir das informações da produção de cimento em MG e da projeção da emissão de CO2 é calculada a emissão específica de CO2 para cada cenário. Esta projeção é apresentada na Figura 16.

Figura 16 - Projeção da emissão específica de CO2 para cada cenário



Na Figura 16, observa-se que nos cenários onde não houve desenvolvimento tecnológico, a emissão específica de CO2 permaneceu quase constante ao longo do período. Nos cenários onde houve avanço tecnológico, a emissão específica reduziu de maneira significativa, passando de 610 kg CO2/t cimento para 456,22 kg CO2/t cimento, cerca de 23% em comparação a emissão específica do ano base.

Considerando que as emissões do processo de calcinação são impossíveis de se evitar, o foco de atenção deverá ser na utilização de combustíveis de baixo carbono e no aumento da eficiência energética nos processos térmicos.

Dado que nos cenários de avanços tecnológicos foi considerado o ganho na eficiência dos processos térmicos, permitindo que se produzindo-se cimento com uma menor necessidade de recursos energéticos, os valores apresentados são razoáveis e são factíveis de serem alcançados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho proporcionou conhecimentos sobre a utilização da energia na indústria de cimento no estado de Minas Gerais. Considerando que este setor está relacionado ao desenvolvimento da infraestrutura do país e ainda, que há que ser desenvolvido neste requisito no Brasil, conclui-se que haverá expansão deste setor industrial, como pode ser verificado por meio dos resultados deste trabalho.

Esta expansão gera impactos na cadeia energética do país. Neste sentido é identificada a necessidade de estudos minuciosos na utilização de recursos energético e nos aspectos ambientais relacionados a esta utilização, pois como foi identificado, há uma predominância da utilização de recursos de origem fóssil (Coque de Petróleo) que são geradores de emissões danosas ao meio ambiente como CO₂ e NO_x.

Observa-se, por meio dos resultados obtidos neste trabalho, que há diferentes cenários possíveis, conforme é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados dos cenários do setor industrial de cimento em MG

Variáveis	Cenários				Ano
	AT & AE	AT & EE	ET & AE	ET & EE	
Demanda de Energia (mil tep)	1.743,58				2015
	2.232,66	1.475,02	2.642,52	1.930,47	2035
	28%	-15%	52%	11%	Δ
Emissão Bruta de CO ₂ (mil t)	4.736,89				2015
	5.935,04	3.920,76	7.204,01	5.245,09	2035
	25%	-17%	52%	11%	Δ
Emissão Específica CO ₂ (kg CO ₂ / t cimento)	610,32				2015
	456,22		610,32		2035
	-25%		-		Δ

Pôde-se observar que os avanços tecnológicos, que resultam em aumento da eficiência energética no processo produtivo, é um fator de grande relevância. Resultando em impactos tanto na demanda de energia pelo setor, quanto, de maneira mais sensível, nas emissões de CO₂.

Dada a grande competição entre os grupos econômicos do setor de cimento, novas estratégias deverão ser adotadas. Pelo fato de os custos relacionados à energia corresponderem cerca de 32% dos custos produtivos, o planejamento energético deveria ser uma prática a ser adotada de maneira ampla por este setor industrial.

Além deste expressivo custo, observa-se também que há diferentes cenários possíveis, e que cada um destes exige diferentes tomadas de decisões quanto a:

- Estratégias de suprimento em resposta aos desafios de atendimento da demanda, garantindo competitividade e sustentabilidade;
- Priorização dos investimentos em tecnologia, de modo a reduzir os custos produtivos e/ou reduzir as emissões de CO₂.

A realização deste estudo de planejamento energético, neste subsetor industrial, poderia gerar um roteiro norteador para as atividades de preparação, organização e estruturação de unidades fabris, e até mesmo em grupos econômicos, quanto à utilização dos recursos energéticos e para subsidiar o desenvolvimento de políticas e tecnologias que tenham como objetivo o aumento da eficiência da utilização da energia e reduzir os impactos ambientais do setor cimento.

Quanto a adoção do modelo e uso do software ENPEP-BALANCE, pode-se verificar que é uma ferramenta de fácil utilização e que apresenta resultados satisfatórios para estudos de planejamento energético, como o balanço entre a oferta e demanda futura de energia, projeção da demanda de energia total, final e útil, preços da energia e emissões.

Using the BALANCE-ENPEP model to balance energy supply and demand in an industrial sector: a study of the cement industry in the state of Minas Gerais

ABSTRACT

The Portland cement is one of the most important building materials and highly employed by mankind. Its high participation in human development, as a basic material for any type of construction, characterizes the cement industry as one of the main sectors for economic and social development. It represents approximately 3% of energy consumption in Minas Gerais (MG), a Brazilian State. To perform this study, it was collected a set of energy consumption parameters and process data, besides economic indicators. Minas Gerais houses the majority of cement plants installed in Brazil. Each stage of production was identified and quantified as related to energy consumption. Initially, the projection of the final consumption of the main energy sources was developed with the average growth method. Then, the future energy demand was calculated using the ENPEP-BALANCE model, for a 20-year analysis period. Results showed that the final energy demand of this sector in the State of Minas Gerais could vary from 1,475 to 2,642 thousand toe, which represents about 34% more or less 15% of the registered demand of the base year. Last, CO₂ emissions were projected for the considered scenarios.

KEYWORDS: Cement industry, Energy Planning, Energy Demand, ENPEP.

REFERÊNCIAS

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Números**. Disponível em: <http://www.snic.org.br/numeros_dinamico.asp>. Acesso em: 25/05/2018.

MDIC, 2012. Subsídios para a elaboração de uma estratégia industrial brasileira para econômica de baixo carbono. **Caderno 3**. Nota Técnica Plano Indústria Subsetor Cimento.

COSTA, F. M. **Estudo de Planejamento Energético para o Setor Industrial de Cimento Portland no Estado de Minas Gerais no Longo Prazo Utilizando o Programa ENPEP**. Dissertação, Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares. UFMG, 2018.

Relatório Anual 2013 – SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento). Disponível em: <<http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>>. Acesso em: 24/11/2017;

SANTI, A. M. M. Cremasco, M. S. Combustíveis e riscos tecnológicos ambientais na fabricação de cimento: avaliação contextualizada no Município de Barroso, Minas Gerais. In: **Encontro da ANPPAS**, 3. Brasília, maio 2006. Brasília, 2006.

HENDRIKS, C. A. WORRELL, E., JAGER, D., BLOK, K., RIEMER, P. **Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry**: Greenhouse gas control technologies conference paper. IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2004.

BEEMG 2016. **31º Balanço Energético do Estado de Minas Gerais – BEEMG, 2016: ano base 2015**. Companhia Energética de Minas Gerais. – Belo Horizonte: Cemig, 2016

SILVA, R. J. **Análise energética de plantas de produção de cimento Portland**. Tese de Doutorado. Universidade de Campinas. Campinas, SP, 1994.

TAVARES, L.M. Um Novo Método para o Cálculo da Ef. Energética de Moinhos Industriais. Disponível em: <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10093/>>. Acesso em: 02/12/2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Tracking industrial energy efficiency and CO2 emissions**. Paris, 2007.

CNI. **Oportunidades de eficiência energética para a Indústria**. Relatório Setorial: Setor Cimenteiro, 2010.

CNI, **Portal Industrias**- Acesso em:

<<http://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/importancia-da-industria/>>.

JANUZZI, G. M. **Planejamento Integrado de Recursos Energéticos Meio Ambiente, Conservação de Energia e Fontes Renováveis**. Campinas, SP: Autores Associados, 1997.

ANL. **Argonne Nacional Laboratory**. Disponível em:

<<https://ceeesa.es.anl.gov/projects/Enpepwin.html#balance>>. Acesso em: 20/11/17.

IAEA. International atomic energy agency. **Expansion planning for electrical generation system**: Guidebook, Viena, 1994. Technical Report Series N241.

JONUSAN. R. A. S. **Estudo de Planejamento Energético para o Setor de Mineração de Minério de Ferro no Estado de Minas Gerais no Horizonte 2014/2035, Utilizando o Modelo ENPEP**. Dissertação, Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares. UFMG, 2017.

CIRILLO, Richard R. **Macroeconomic Analysis in Energy Planning**. Training Seminar on the Energy and Power Evaluation Program (ENPEP). IAEA Technical Cooperation Assistance BRA/0.013.

CAMIOTTO, F. C. REBELATTO. D. A N. Emissões de CO2 pelos setores industriais: um auxílio as políticas públicas ante ao desafio das mudanças climáticas globais. **XXXI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUCAO**. Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual: Desafios da Engenharia de Produção na Consolidação do Brasil no Cenário Econômico Mundial. Belo Horizonte, MG, 20

Recebido: 10 mar. 2019.

Aprovado: 26 jun. 2019.

DOI: 10.3895/rts.v15n37.9822

Como citar: COSTA, F. M. Utilizando o modelo BALANCE-ENPEP para realizar o balanço entre a oferta e a demanda de energia num setor industrial: estudo da indústria de cimento no estado de Minas Gerais. **R. Technol. Soc.**, Curitiba, v. 15, n. 37, p. 679-699, jul./set. 2019. Disponível em: <<https://periodicos.ufpr.edu.br/rts/article/view/9822>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Fernando Malaquias Costa

-

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

