2014

PRODUÇÃO DE CAL

EBC

Núcleo de Estudos de Economias de Baixo Carbono

Prof. Dr. Vanderley M. John
(Escola Politécnica da USP)

Prof. Dra. Katia R. Garcia Punhagui
(Escola Politécnica da USP, Universidade Estadual de Londrina)

Profa. Dra. Maria Alba Cincotto
(Escola Politécnica da USP)

Equipe de Coordenação do Projeto Economia de Baixo Carbono – 2ª Fase

Coordenação Geral – Rudinei Toneto Junior
Coordenação Geral Adjunta – Marcelo Pinho

Coordenação de Estudos Setoriais 2014
Ferro-gusa - Germano Mendes de Paula
Cal - Katia R. Garcia Punhagui; Vanderley M. John; Maria Alba Cincotto
Vidro - Mauro Akerman

Auxiliares de Coordenação
Beatriz Selan
Guilherme Henrique Albertin dos Reis

Estagiário
Felipe Leite

Este projeto foi realizado com recursos do Fundo de Estruturação de Projetos (FEP) do BNDES. O conteúdo é de exclusiva responsabilidade dos autores, não refletindo, necessariamente, a opinião do BNDES. Informações sobre o FEP encontram-se em HTTP://www.bndes.gov.br

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E CONTABILIDADE DE RIBEIRÃO PRETO
CONTRATO DE COLABORAÇÃO FINANCEIRA NÃO-REEMBOLSÁVEL
N° 11.2.0488.1
FUNDACE – BNDES

ECONOMIA DE BAIXO CARBONO: AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DE RESTRIÇÕES E PERSPECTIVAS TECNOLÓGICAS

PRODUÇÃO DE CAL

Relatório Final

Prof. Dr. Vanderley M. John

Prof. Dra. Katia R. Garcia Punhagui

Profa. Dra. Maria Alba Cincotto

RIBEIRÃO PRETO-SP
DEZEMBRO – 2014

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 1

1. CARACTERIZAÇÃO SETORIAL 2

1.1. Principais produtos e setores demandantes 2

1.2. Principais países produtores 4

1.3. Etapas da cadeia de produção 4

1.4. Tecnologias de produção 8

2. QUADRO NACIONAL 11

2.1. Rotas tecnológicas no Brasil 11

2.2. Distribuição espacial da produção 16

2.3. Evolução da produção, do consumo e do comércio exterior 18

3. IMPACTOS AMBIENTAIS SETORIAIS 22

3.1. Impactos locais e globais (resíduos sólidos, líquidos e gasosos) e subprodutos 22

3.1.1. Resíduos e subprodutos 23

3.1.2. Outros impactos 24

3.2. Fontes de insumos por tipo de forno e etapas do processo 25

3.2.1. Energia consumida 26

3.3. Emissões de dióxido de carbono 27

4. BALANÇO DE CARBONO E INVENTÁRIO DE EMISSÕES DE GEE 28

4.1. Emissões de CO_2 provenientes da descarbonatação do calcário 29

4.2. Emissões de CO_2 provenientes da queima de combustíveis 31

4.3. Resumo dos valores adotados para a composição de cenários 35

5. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E MUDANÇA TECNOLÓGICA 35

5.1. Novas rotas tecnológicas 36

5.1.1. Calcinador solar 36

5.2. Redução das emissões de CO_2 36

5.2.1. Mudança na matriz energética 36

5.2.2. Captura e sequestro de dióxido de carbono 37
5.3. Aumento da eficiência energética 38
5.3.1. Uso de fornos eficientes ou modernização de fornos 38
5.3.2. Uso de moinhos eficientes 38
5.3.3. Controle do processo – automação 39
5.3.4. Lavagem do calcário 39
5.4. Redução dos resíduos 39
5.4.1. Diminuição de perdas 39
5.4.2. Melhoramento do rendimento da matéria-prima 40
5.5. Redução da emissão de poeira 40
6. PROJEÇÕES DAS EMISSÕES SETORIAIS DE CO_2 NO BRASIL ATÉ 2020 41
6.1. Metodologia empregada para a criação dos cenários 42
Cenário 1 – Cenário base 44
Cenário 2 - Mudança de combustíveis 45
Cenário 3 - Mudança de tecnologia 46
Cenário 4 - Mudança de combustíveis e tecnologia 48
6.2. Resultados dos cenários 48
Cenário 1 – Cenário base 48
Cenário 2 – Mudança de combustíveis 51
Cenário 3 – Mudança de tecnologia 53
Cenário 4 – Mudança de combustíveis e tecnologia 55
7. DIRETRIZES DE UMA POLÍTICA PÚBLICA SETORIAL PARA A TRANSIÇÃO RUMO À ECONOMIA DE BAIXO CARBONO 58
BIBLIOGRAFIA 61

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Tabela 1 – Algumas aplicações da cal por setor 3
Tabela 2 – Principais países produtores de cal (2013) 4
Tabela 3 – Fornos de cal mais comuns em países industrializados.....11
Tabela 4 – Quantidade de cal produzida e vendida no Brasil (mil toneladas) de acordo com diferentes fontes. 20
Tabela 5 – Exigências químicas para cal virgem definidas pela NBR 6.453.....29
Tabela 6 – Exigências químicas para cal hidratada definidas pela NBR 7.175.....29
Tabela 7 - Emissões de CO_2 da cal virgem (kgCO_2/t $_{produto}$) 30
Tabela 8 - Emissões de CO_2 da cal hidratada (kgCO_2/t $_{produto}$) 30
Tabela 9 - Emissões de CO_2 da cal hidratada (kgCO_2/t $_{hidróxido}$) 30
Tabela 10 – Fatores de conversão de energia e emissão de CO_2 31
Tabela 11 – Energia e emissão de CO_2 segundo tipos de cal e fornos - resultante de levantamento de referências nacionais e empresas 33
Tabela 12 – Valores considerados para a composição dos cenários.....35
Tabela 13 - Resumo da avaliação prévia das estratégias para diminuição de impactos na produção de cal.....41
Tabela 14 – Distribuição da produção de cal entre calcítica e dolomítica 44
Tabela 15 – Estimativa de produção de cal até ano 2020.....44
Tabela 16 – Produção de cal por tipo de forno.....45
Tabela 17 – Resultados do Cenário 1 49
Tabela 18 - Resultados do Cenário 1 considerados para discussão dos demais cenários.....51
Tabela 19 - Emissões de CO_2 resultantes da substituição de madeira fonte de carbono por madeira neutra em carbono 52
Tabela 20 - Emissões de CO_2 resultantes da substituição integral do coque de petróleo por gás natural 52
Tabela 21 - Emissões de CO_2 resultantes do aumento da moinha (ou outro combustível neutro em carbono) na matriz energética em detrimento ao coque de petróleo 53
Tabela 22 - Emissões de CO_2 e energia consumida resultantes da mudança de FV-CS para FV-FPR no estado de São Paulo 54

Tabela 23 – Emissões de CO_2 e energia consumida resultantes da mudança de FV-A para FV-CS e FV-CS para FV-FPR 54
Tabela 24 – Emissões de CO_2 resultantes da diminuição de madeira fonte de carbono para 3% a 8% e aumento da moinha para 14% 55
Tabela 25 – Emissões de CO_2 resultantes da diminuição de madeira fonte de carbono para 0% e aumento da moinha para 23% 56
Tabela 26 – Emissões de CO_2 e energia consumida resultantes da mudança de combustíveis e fornos 56
Tabela 27 - Resumo dos resultados dos cenários estudados 57

Gráfico 1 - Produção mundial de cal no ano 2013 4
Gráfico 2 – Distribuição da produção da cal por estados ou regiões 17
Gráfico 3 – Distribuição do consumo da cal segundo aplicações por setor 19
Gráfico 4 – Evolução da produção da cal virgem (CV) e cal hidratada (CH) no Brasil 21
Gráfico 5 – Variação da produção versus número de empresas informantes sobre a produção, dado do IBGE 21
Gráfico 6 – Distribuição das fontes energéticas da produção de cal - combustíveis utilizados em fornos de calcinação.....25
Gráfico 7 – Percentual das emissões de CO_2 por descarbonatação e calcinação no total das emissões.....49

Figura 1 – Diagrama sintético das etapas de produção da cal.....5
Figura 2 – Imagens ilustrativas do processo de produção da cal (Brasil) feito por empresas de grande porte 7
Figura 3 – Imagens ilustrativas de tipos de fornos encontrados no país 13
Figura 4 – Sistema de injeção de serragem em forno de barranco típico do Paraná 14
Figura 5 – Imagens ilustrativas de mineração do calcário com emprego de tecnologia mais avançada 15
Figura 6 – Imagens ilustrativas de mineração do calcário com emprego de tecnologia menos avançada 15
Figura 7 – Imagem ilustrativa de pedras de cal virgem produzidas por FH-R e FV-FPR 47

Quadro 1 – Principais Empresas Produtoras de Cal no Brasil.....18

Box 1 – Método empregado para a projeção de demanda setorial 42
Box 2 – Conceito de fonte de carbono e carbono neutro relacionados à madeira 46

INTRODUÇÃO

O presente relatório refere-se ao resultado final da pesquisa sobre o setor da cal, que cobre a atividade de fabricação de cal (óxidos e hidróxidos de cálcio e magnésio), parte da categoria 23.92-3 da CNAE 2.0 – Fabricação de cal e gesso.

A pesquisa não inclui a cal produzida em operações unitárias de outras atividades industriais, em que é produzida exclusivamente para o consumo da planta industrial à qual está integrada (mercado cativo), tampouco as operações que comercializam, com ou sem beneficiamento, resíduos industriais constituídos de hidróxido de cálcio e magnésio.

1. CARACTERIZAÇÃO SETORIAL

1.1. Principais produtos e setores demandantes

A cal é um elemento de uso variado. Há vestígios de seu uso, no estado virgem (CaO) e hidratado ($Ca(OH)_2$) cerca de 1.000 anos a.C. nas civilizações grega, romana, egípcia, maia, inca e chinesa, entre outras (EIPPCB; IPTS, 2013). Atualmente a cal abastece os setores industriais de produção de metais ferrosos e não ferrosos, cimento, celulose e papel, química, farmacêutica e higiene pessoal e alimentos, bem como agricultura, silvicultura e piscicultura, construção civil e aplicações de cunho ambiental (EIPPCB; IPTS, 2013)(IPCC, 2006). Alguns exemplos de aplicação por setor encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Algumas aplicações da cal por setor

Setor	Aplicações
Tratamento de efluentes e gases	Tratamento de água para abastecimento geral, de esgoto doméstico e industrial e como agente dessulfurante no controle de emissões atmosféricas da indústria.
Agricultura, silvicultura e piscicultura	Componente de fertilizantes, estabilizador do PH do solo, alcalinização de lagoas, proteção de área de criação de frangos.
Celulose e papel	Neutralização do licor negro, como agente redutor na produção de papéis alcalinos.
Água e combustão de gases	Tratamento de água potável e águas residuais, purificação de gases de combustão (lavagem úmida e seca)
Indústria alimentícia	Redutor de acidez e/ou clarificador no setor cítrico, sucro-alcooeiro, de laticínios, na produção de alimentos (humanos e animal) etc.
Indústria farmacêutica e saúde	Agente saneador de ambiente e bactericida, para manufatura de produtos fitofarmacêuticos, perfumes e fragrâncias, pomadas etc.
Indústria química	Fundente ou agente de ligação, fonte de cálcio e alcalinidade, na manufatura de produtos como carbonato de cálcio precipitado, carbureto de cálcio, óxido de propeno, cloreto de cálcio, hipoclorito de cálcio, entre outros.
Indústria de aço	Na siderurgia é usada como aglomerante na pelotização do minério de ferro, na produção de sínter, na dessulfuração do gusa, protetor de revestimento refratário dos fornos, lubrificante na trefilaria, aciaria a oxigênio.
Indústria de metais não ferrosos	Cal usada para o refino de metais não ferrosos. Na produção do alumínio primário é usada para aumentar a solubilidade da alumina e controlar o teor de fósforo.
Outras indústrias	Na produção de vidros (como fundente); refratários; pigmentos; borrachas; têxteis, couro e pele; equipamentos elétricos, informáticos, eletrônicos e óticos; fabricação geral de máquinas, veículos; móveis.
Construção	Na composição de argamassa de alvenaria, tintas, pavimentação asfáltica, estabilização de solo etc.

Fonte de referência: (ILA, 2014)(ABPC, 2014a)(ECHA, 2014)

Alguns produtos em que a cal é parte integrante do processo de manufatura são: adesivos, selantes, adsorventes, metais e ligas, biocidas, revestimentos, tintas, diluentes, betumes, gesso, explosivos, adubos, combustíveis, fluidos de transferência de calor e hidráulicos, tintas e toners, produtos como reguladores de PH, floculantes, precipitantes, agentes de neutralização, produtos químicos de laboratório, curtimento de couro, lubrificantes, produtos farmacêuticos, misturas de cera, preparação de polímeros e compostos, semiconductores, produtos de limpeza, produtos químicos para tratamento de água, produtos para soldagem, cosméticos, produtos de higiene pessoal, agentes de extração, entre outros (ECHA, 2014).

1.2. Principais países produtores

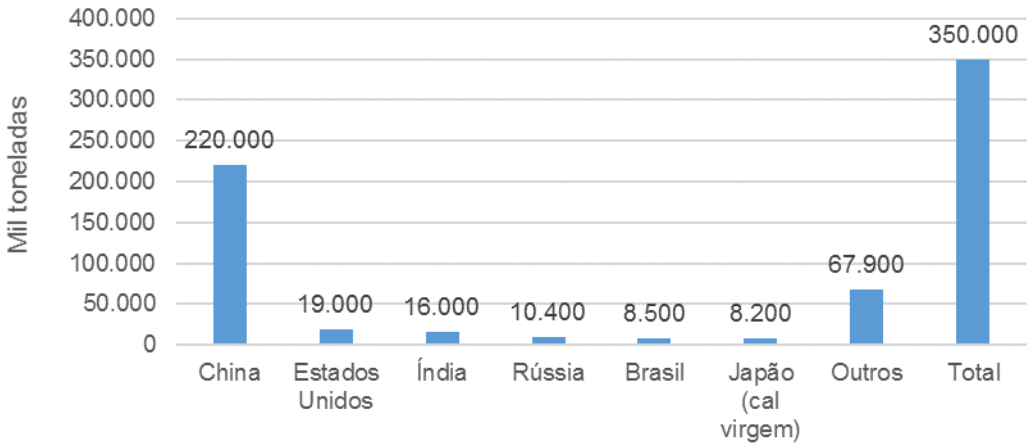
O principal país produtor de cal é a China com 63% da produção mundial. Com produção bem menor, mas entre os maiores produtores estão Estados Unidos, Índia, Rússia e Brasil, somando cerca de 16%. Em 2013 a produção do Brasil foi de aproximadamente 8,4 a 8,5 milhões de toneladas (SEABRA, 2014a)(USGS, 2014), colocando-o na quinta posição no ranking mundial de produtores segundo a USGS (*United States Geological Survey*) (USGS, 2014) (Tabela 2) (Gráfico 1).

Tabela 2 – Principais países produtores de cal (2013)

País	Produção estimada (1000 toneladas)	Porcentagem da produção total
China	220.000	62,8%
Estados Unidos	19.000	5,9%
Índia	16.000	4,6%
Rússia	10.400	2,9%
Brasil	8.500	2,4%
Japão (somente cal virgem)	8.200	2,3%
Outros	67.900	19,9%
Total	350.000	100%

Fonte de referência: (USGS, 2014)

Gráfico 1 - Produção mundial de cal no ano 2013

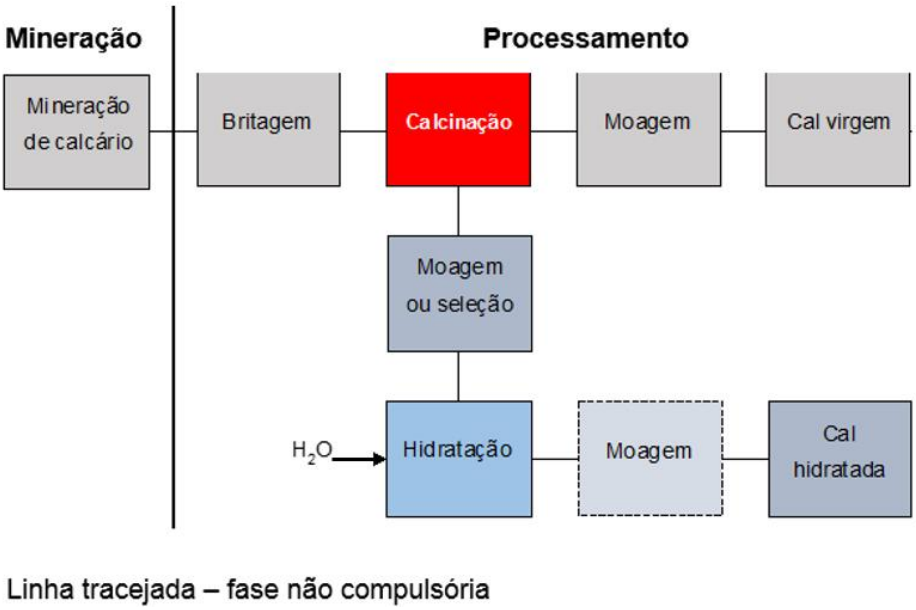


Fonte de referências: (USGS, 2014)

1.3. Etapas da cadeia de produção

De forma geral, a produção da cal virgem passa pelas seguintes etapas: mineração do calcário, britagem, calcinação e moagem. Já a produção da cal hidratada agrega as fases de separação ou moagem, hidratação e moagem (conforme Figura 1 e Figura 2).

Figura 1 – Diagrama sintético das etapas de produção da cal



Fonte de referência: autores

A **mineração** do calcário consiste no desmonte da jazida de calcário e pode ser feita por perfuração para implantação de explosivos ou com rompedor e retroescavadeira em sistemas mais rudimentares de produção. Após o desmonte ocorre o carregamento, feito com carregadeiras, e o transporte da matéria-prima até o britador, feito em caminhões (VOTORANTIM, 2007)(VOTORANTIM, 2014)(COÊLHO, 2013).

A **britagem** objetiva produzir partículas da rocha calcária com granulometria adequada ao forno utilizado na calcinação. Está dividida em britagem primária e secundária com diferentes capacidades de redução da rocha, que será classificada segundo a faixa granulométrica por meio de peneiras que separam o material destinado a calcinação, operação que exige bitola apropriada, das demais frações, que podem seguir para outros mercados, eventualmente após processamento adicional. O material britado é usualmente armazenado ao ar livre organizado em pilhas tipo silo trincheira. O transporte até o local de calcinação é feito usualmente por meio de correias transportadoras – o uso de outros transportes, como caminhões, também ocorre. Os finos gerados não podem ser calcinados, mas podem ser comercializados como agregado, ou moído como filler ou para a produção de calcário agrícola (VOTORANTIM, 2014).

A **calcinação** visa descarbonatar (remover o CO_2 combinado com os óxidos de cálcio ou magnésio) o calcário para a produção de cal virgem. O processo ocorre em fornos que operam em altas temperaturas (900 e 1200 ˚C (EIPPCB; IPTS, 2013)(SILVA, 2007). Os tipos de fornos, tecnologias e combustíveis empregados variam consideravelmente, embora o processo químico seja o mesmo: calcário + calor = cal virgem + dióxido de carbono. Após a descarbonatação, o produto é transportado para local de armazenamento prévio à moagem. A cal virgem estocada é direcionada à moagem por meio de correias transportadoras (VOTORANTIM, 2014).

A **moagem** é feita em moinhos e visa diminuir a granulometria da cal virgem a tamanhos adequados à sua destinação final ou à hidratação. Após a moagem, o produto é novamente estocado em silos ou transportado até o local de hidratação, que pode ser feita no mesmo parque industrial ou em parques de terceiros.

Antes da **hidratação** podem ocorrer a **moagem ou seleção** do material (SEABRA, 2014a), que visam a regularização e classificação granulométrica do material. Ao final deste processo, o insumo é transportado para o local de hidratação.

A **hidratação** da cal é feita em hidratadores[1], com produção contínua ou por batelada. Este processo, ao adicionar água, transforma os óxidos de cálcio (CaO) ou magnésio (MgO) em hidróxidos de cálcio ou magnésio, substâncias adequadas para vários mercados, mas principalmente para a construção civil. O processo é expansivo e exotérmico, com uma liberação de energia de aproximadamente 1,14 MJ/kg de óxido de cálcio (QUALICAL, 2014)(EIPPCB; IPTS, 2013) e temperatura ideal de hidratação de 74°C (SILVA, 2007). O processo de hidratação deve ser controlado e respeitar o tempo mínimo para a cura do material, evitando assim reações exotérmicas e expansivas ocorram na utilização do produto (VOTORANTIM, 2014).

A última etapa é acondicionamento para transporte, usando tecnologias variáveis de acordo com o produto, o mercado e o cliente. Para a construção civil o usual é o envio do material ensacado e paletizado.

---

[1] Embora existam várias configurações de hidratadores, de modo geral, consistem em um tanque cilíndrico com duas hélices rotativas que agitam vigorosamente a solução de cal e água (SILVA, 2007).

Figura 2 – Imagens ilustrativas do processo de produção da cal (Brasil) feito por empresas de grande porte

1 - Jazida de calcário
Fonte de ilustração: (SEMGRH, 2012)

2 - Mineração (perfuração)
Fonte de ilustração: (VOTORANTIM, 2007)

2 – Mineração (detonação)
Fonte de ilustração: (VOTORANTIM, 2007)

2 – Mineração (carregamento e transporte)
Fonte de ilustração: (ZRCBV, 2012)

3 – Britagem
Fonte de ilustração: (VOTORANTIM, 2014)

4 – Calcinação fornos verticais
Fonte de ilustração: (CAL OESTE, 2014)

5 – Moagem em moinhos de bolas
Fonte de ilustração: (VOTORANTIM, 2007)

6 – Hidratação
Fonte de ilustração: (VOTORANTIM, 2014)

7 – Embalagem
Fonte de ilustração: (ZRCBV, 2012)

8 – Expedição ao mercado
Fonte de ilustração: (ICAL, 2013)

1.4. Tecnologias de produção

A transformação da rocha calcária em cal virgem ou hidratada pode utilizar tecnologias muito variadas segundo o grau de desenvolvimento local ou o porte do fabricante.

São encontrados no setor desde pequenos produtores com processos rudimentares como a extração com rompedor, diminuição do tamanho das pedras e carregamento manual da rocha calcária, trituração e queima em fornos rústicos de uma câmara construídos por tijolos, com alimentação manual e que empregam madeira de fonte variável como combustível; até grandes produtores que operam em escala internacional, utilizando tecnologia avançada, incluindo planejamento de mineração em softwares 3D, fornos alta produtividade e eficiência térmica, equipamentos de controle de emissões de partículas, blendas combustíveis para atender mercados específicos e laboratórios para controle de qualidade de processo e produto.

Os principais modelos de fornos para calcinação do calcário incluem: (1) forno longo rotativo, (2) forno rotativo com pré-aquecidor, (3) forno de fluxo paralelo regenerativo, (4) forno de eixo anular, (5) forno vertical de alimentação mista, (6) outros fornos (EIPPCB; IPTS, 2013)(IFC; WBG, 2007)(USGS, 2013).

Os **fornos longos rotativos** são constituídos por um cilindro de comprimento até 150 metros, diâmetro entre 2 e 4,5 metros e inclinação entre 1 e 4 graus em relação à horizontal. O calcário é inserido pela extremidade mais alta enquanto a combustão ocorre na extremidade inferior, próximo à saida do material. A cal é conduzida a um resfriador à ar que é depois utilizado para na combustão. Algumas vantagens são grande flexibilidade no uso de combustíveis e granulometria do calcário e menor quantidade de CO_2 residual. Entre as desvantagens estão o alto consumo de energia, associado a perda de energia por radiação na área do cilindro

e pelo ar e, dependendo do combustivel e do calcário, emissão de enxofre (EULA, 2006a) apud (EIPPCB; IPTS, 2013).

Os **fornos horizontais rotativos com pré-aquecedor** são usualmente menores que os fornos rotativos longos, com comprimento de até 90 metros. O uso de calor diminui devido a menores perdas por radiação e convecção, e aumento da recuperação do calor dos gases de exaustão. Além das vantagens encontradas no modelo longo, esse exige menor uso de combustível devido às menores perdas de calor, havendo como desvantagem uma parte a mais (pré-aquecedor) para manutenção (EULA, 2006a) apud (EIPPCB; IPTS, 2013).

Os **fornos verticais de fluxo paralelo regenerativo** são constituídos por dois cilindros verticais paralelos conectados por um canal de passagem (podem ser circulares ou retangulares) (VERBOR, 2014). O combustível é injetado na parte superior, desce até a zona de calcinação, onde encontra o fluxo secundário ascendente injetado na parte inferior que sobe resfriando a cal virgem. Ao se encontrarem são transferidos para o canal de passagem, e para o cilindro ao lado, onde sobem, aquecendo o calcário. A alimentação de calcário e a combustão ocorrem de forma alternada entre cilindros, invertendo a direção do fluxo[2]. Entre as vantagens estão a redução do consumo de combustível e a possibilidade de utilização de diferentes combustíveis, inclusive resíduos ou biomassa, e eficiência energética. Entre as desvantagens estão o custo do refratário (EULA, 2006a) apud (EIPPCB; IPTS, 2013).

O forno vertical de eixo anular é constituído de um cilíndrico externo que contém um cilindro interno concêntrico. A parte inferior do cilindro central recebe os gases que sobem preaquecidos pelos óxidos, e que são (já aquecidos) empregados na combustão. Isto faz com que a fase final de calcinação possa ocorrer em menores temperaturas. Entre as vantagens destaca-se baixo CO_2 residual, boa distribuição do calor, o que resulta em produto mais homogêneo, aceita boa

[2] O processo de calcinação ocorre em duas etapas que duram de 8 a 15 minutos. Na primeira etapa, a mistura ar-combustível é injetada no eixo 1 desde a parte superior; o calor gerado é parcialmente utilizado na decomposição do calcário presente no eixo 1; o ar de resfriamento é transferido para dentro dos eixos 1 e 2 desde suas bases; este, junto com os gases de combustão e do CO_2 da calcinação são transferidos para o eixo 2 pelo canal de passagem que se mantem a temperatura em torno de 1.050°C; no eixo 2 os gases provenientes do eixo 1 são utilizados para o pré-aquecimento do eixo 2 (EIPPCB; IPTS, 2013).

variedade de combustíveis (gás, óleo ou combustível sólido), e economia de combustível devido a reutilização dos gases de combustão. Entre as desvantagens destaca-se a demanda de manutenção dos recuperadores de calor e câmaras exteriores (EULA, 2006a) apud (EIPPCB; IPTS, 2013).

Os **fornos verticais de cuba simples** mais simples são constituídos por uma câmara vertical de cerca de 30 metros de altura e diâmetro de 6 metros. A alimentação do calcário ocorre pela parte superior passando pelos diversos estágios até a saída da cal pela parte inferior. O forno vertical de alimentação mista insere o calcário misturado com o coque siderúrgico com granulometria pouco inferior à da rocha (fazendo com que o combustível desça pela câmara em conjunto com a matéria-prima). Dentre as vantagens destaca-se o uso do ar de arrefecimento para combustão e menor quantidade de ar excedente, menor necessidade de energia elétrica para ventiladores e custo mais baixo. Entre as desvantagens está a desuniforme distribuição do calor (EULA, 2006a) apud (EIPPCB; IPTS, 2013).

Outros fornos incluem forno vertical duplo inclinado, forno vertical multi-câmara, forno rotativo com pré-aquecedor de grelha, forno rotativo de eixo pré-aquecedor, forno rotativo com pré-aquecedor de ciclone, forno de grelha móvel, calcinação com suspensão à gás, forno de leito fluidizado (EIPPCB; IPTS, 2013) (IEA, 2007). Há ainda, no âmbito dos fornos artesanais, o “forno de barranco” – uma variedade de forno vertical de baixa sofisticação e que pode operar à lenha – como será discutido no ver item 2.1.

A Tabela 3 resume de algumas características dos fornos industriais mais comuns no setor de cal nos países desenvolvidos.

Tabela 3 – Fornos de cal mais comuns em países industrializados

		Rotativos* (FH-R)	Fluxo paralelo regene-rativo (FV-FPR)	Eixo Anular (FV-EA)	Vertical de coluna simples (FV-CS)
Energia térmica (GJ/t)		5,1 - 9,2	3,2 - 4,2	3,3 - 4,9	3,4 - 4,7
Eletricidade (kWh/t)		17 - 45	20 - 41	18 - 50	5 - 15
Produção (t/dia)		100 - 1.500	100 - 600	80 - 300	60 - 200
Faixa granulométrica (mm)		2 - 60	10 - 200	40 - 150	20 - 200
Combustível	Gás	X	x	x	
	Sólidos pulverizados	X	x	x	
	Líquidos pulverizados	X	x	x	
	Resíduos	X	x	x	
	Biomassa	X	x	x	
	Coque metalúrgico				x
	Carvão				x
Eletricidade utilizada em outras partes do processo (kWh/t)					
Hidratação, classificadores de ar e equipamentos de transporte					5 – 30
Moagem					4 - 40

*Fornos rotativos longos com consumo de energia térmica entre 6,0 e 9,2 GJ/t e energia elétrica entre 18 e 25 kWh/t, e fornos rotativos com pré-aquecedor com consumo de energia térmica entre 5,1 e 7,8 e energia elétrica entre 17 e 45 kWh/t.

Fonte de referência: (EULA, 2006a) apud (EIPPCB; IPTS, 2013), (EU, 2013), (IEA, 2007), (CIMPROGETTI, 2012)

2. QUADRO NACIONAL

2.1. Rotas tecnológicas no Brasil

Grandes variações na rota tecnológica de produção da cal podem ser observadas na etapa de mineração e calcinação, onde os tipos de equipamentos e fornos utilizados definem o desempenho, produtivo e ambiental, do processo de produção.

No Brasil, o setor da cal é marcado pela presença tanto de grandes empresas internacionais e nacionais, que operam de maneira formal utilizando tecnologia similar a dos países desenvolvidos, quanto de pequenas empresas que produzem cal em fornos artesanais intermitentes, alimentados por biomassa de procedência variável, adotam processos com baixa eficiência e atuam com graus variados de informalidade trabalhista, ambiental, fiscal e de qualidade de produto. Naturalmente, é difícil estimar a quantidade de cal produzida sem licença ambiental mas fontes do mercado estimam algo entre 15% e 20% da produção. Se incluída também a informalidade fiscal, estimam-se taxas superiores.

A ABPC (Associação Brasileira de Produtores de Cal) classifica as empresas em integradas, não integradas, transformadores e produtor cativo (ABPC, 2014a). Produtores integrados e não integrados realizam toda a transformação industrial em suas próprias instalações (fornos de calcinação, pulverizadores e, eventualmente, hidratadores), distinguindo-se os primeiros dos segundos pelo controle da fonte de matéria-prima (mina própria). Os transformadores realizam a moagem de cal virgem e/ou produzem cal hidratada a partir de cal virgem adquirida de terceiros, utilizando moinhos e hidratadores próprios[3]. Entre os produtores cativos, destacam-se usinas siderúrgicas e as indústrias de celulose de grande porte que fabricam a cal para uso próprio.

Além dessa classificação, pode-se propor outra, que combina critérios de escala e atualização tecnológica: 1) empresas de grande porte que operam com tecnologia moderna, 2) empresas de grande porte que operam em situação de defasagem tecnológica, 3) empresas com certa escala – cerca de 100 mil toneladas por ano – que operam com técnicas rudimentares, 4) pequenas empresas que operam com técnicas rudimentares.

Com efeito, é possível identificar vários tipos de fornos usados no processo de calcinação no Brasil (Figura 3). Os fornos mais comuns são o forno vertical de cuba simples (conhecidos como Azbe), fornos de fluxo paralelo regenerativo (conhecidos como Maerz), fornos rotativos e os fornos de alvenaria. Estes são "produtos artesanais" de uma ou múltiplas câmaras[4], bastante rudimentares. São fornos construídos de alvenaria, quase sempre apoiados em encostas – o que facilita a carga de calcário na sua parte superior, já que tanto a carga quanto a descarga são manual ou semiautomática. O combustível é inserido pela parte inferior do forno. De forma geral, estes fornos não têm zona de resfriamento nem tampouco recirculam os gases aquecidos, sendo a eficiência energética baixa.

Os fornos de alvenaria e de fluxo paralelo regenerativo demarcam os extremos de menor e maior eficiência energética, emissões de CO_2 e de tecnologia empregada.

---

[3] Também é classificada como transformadora a empresa que produz cal hidratada recuperada a partir do reprocessamento de subprodutos industriais.

[4] Seria a tecnologia comumente utilizada no Paraná. Nestes fornos se emprega lenha ou derivados de lenha.

Figura 3 – Imagens ilustrativas de tipos de fornos encontrados no país

Forno vertical de alvenaria
Fonte de ilustração: (PANORAMIO, 2014)

Forno rotativo
Fonte de ilustração: (JOHN, 2014)

Conjunto de fornos vertical simples tipo Azbe
Fontede ilustração: (LAPA VERMELHA, 2014)

Forno vertical de fluxo paralelo regenerativo
Fonte de ilustração: (VERBOR, 2014)

No Paraná, predominam fornos de alvenaria (semi-contínuos), em grande parte com sopradores para a queima de serragem (Figura 4) proveniente da indústria madeireira ou fornos movidos a cavaco de madeira. Em São Paulo, os fornos predominantes são do tipo Azbe, movidos à madeira (gaseificada). Em Minas Gerais, na região metropolitana de Belo Horizonte predominam fornos tipo Maerz e fornos rotativos com queima de coque verde de petróleo (CVP)[5] e em alguns casos, menos comuns, gás natural. Na região centro-oeste desse mesmo estado, área em que se situam as cidades de Arcos, Pains, Divinópolis e Itaú de Minas, encontram-se dois cenários distintos: grandes empresas com fornos rotativos e/ou verticais que

[5] Coque “verde” de petróleo é um combustível com elevado teor de carbono fixo composto por hidrocarbonetos e baixos teores de compostos inorgânicos, com baixo teor de enxofre (PETROBRÁS, 2014).

empregam CVP e lenha como combustível, e pequenos e médios produtores que usam fornos verticais muito antigos ou fornos semi-contínuos de alvenaria (“forno de barranco”), com queima de óleo, lenha e resíduos ilegais (lixo industrial e pneus, entre outros). Em outras regiões, os fornos de alvenaria (artesanais) e antigos fornos verticais são comuns. Na produção cativa (fora do escopo deste estudo) predominam os fornos verticais com queima de gases de processo siderúrgicos e CVP (ABPC, 2014c).

Figura 4 – Sistema de injeção de serragem em forno de barranco típico do Paraná

Fonte de referência: (APL, 2008)

Atualizações e adaptações tecnológicas são feitas com o intuito de melhorar o desempenho dos fornos, mas o resultado, embora superior ao padrão de partida, não será o mesmo que aquele conseguido com a troca de fornos menos eficientes por outros de melhor desempenho. Um exemplo de modificação no sistema de combustão são os maçaricos ou “sopradores” de serragem, instalados em fornos de alvenaria, comumente encontrados no estado do Paraná (SEABRA, 2014a).

No âmbito da mineração, encontram-se empresas que utilizam equipamentos como perfuratrizes e explosivos para o desmonte da jazida e carregadeiras e caminhões de grande porte para a condução do material. Operam com licença ambiental e fazem ensaios laboratoriais para garantir a qualidade da matéria-prima (Figura 5). Por outro lado há produtores que empregam o rompedor para o

desmonte da jazida, fazem a diminuição do tamanho das pedras e carregamento manualmente e utilizam caminhão convencional para o transporte do calcário, que é analisado visualmente (Figura 6). Ambos os processos compõem o cenário da produção da cal no Brasil.

Figura 5 – Imagens ilustrativas de mineração do calcário com emprego de tecnologia mais avançada

Extração da cal por explosivos
Fonte de ilustração: (ICAL, 2013)

Carregamento e transporte da cal
Fonte de ilustração: (ICAL, 2013)

Figura 6 – Imagens ilustrativas de mineração do calcário com emprego de tecnologia menos avançada

Extração da cal por
Fonte de ilustração: (COÊLHO, 2013)

Carregamento manual e transporte da cal
Fonte de ilustração: (COÊLHO, 2013)

No país a tecnologia mais recente em uso é o forno vertical de fluxo paralelo regenerativo (FV-FPR). Não há, até o presente momento, identificação de outra técnica mais recente ou inovadora que seja empregada no território nacional.

Segundo o Instituto Aço Brasil, a motivação para a implantação da tecnologia FV-FPR veio de um projeto de expansão da CST (atual Arcelor Mittal Tubarão) que culminou em um acordo com o Grupo Lhoist, responsável por construir dois fornos para produção de 309 mil toneladas de cal por ano (IABR; CST, 2004).

Também no âmbito internacional, os fornos com sistema de fluxo paralelo regenerativo são considerados os de melhor desempenho com relação às emissões

de CO_2, devido ao menor consumo de combustível, possibilidade de uso de biomassa (EIPPCB; IPTS, 2013)(CIMPROGETTI, 2012). Há outras iniciativas que visam a diminuição ou troca de combustíveis no processo de calcinação, como é o caso do calcinador solar (MEIER; GREMAUD; STEINFELD, 2005)(MEIER et al., 2006) (reator químico solar para a calcinação de partículas de calcário (QUALICAL et al., 2000)), que foi estudado e teve um protótipo construído, mas ainda não se tem notícia de seu uso em escala industrial. Este projeto foi uma parceria entre um instituto de pesquisa e uma empresa privada (QUALICAL et al., 2000).

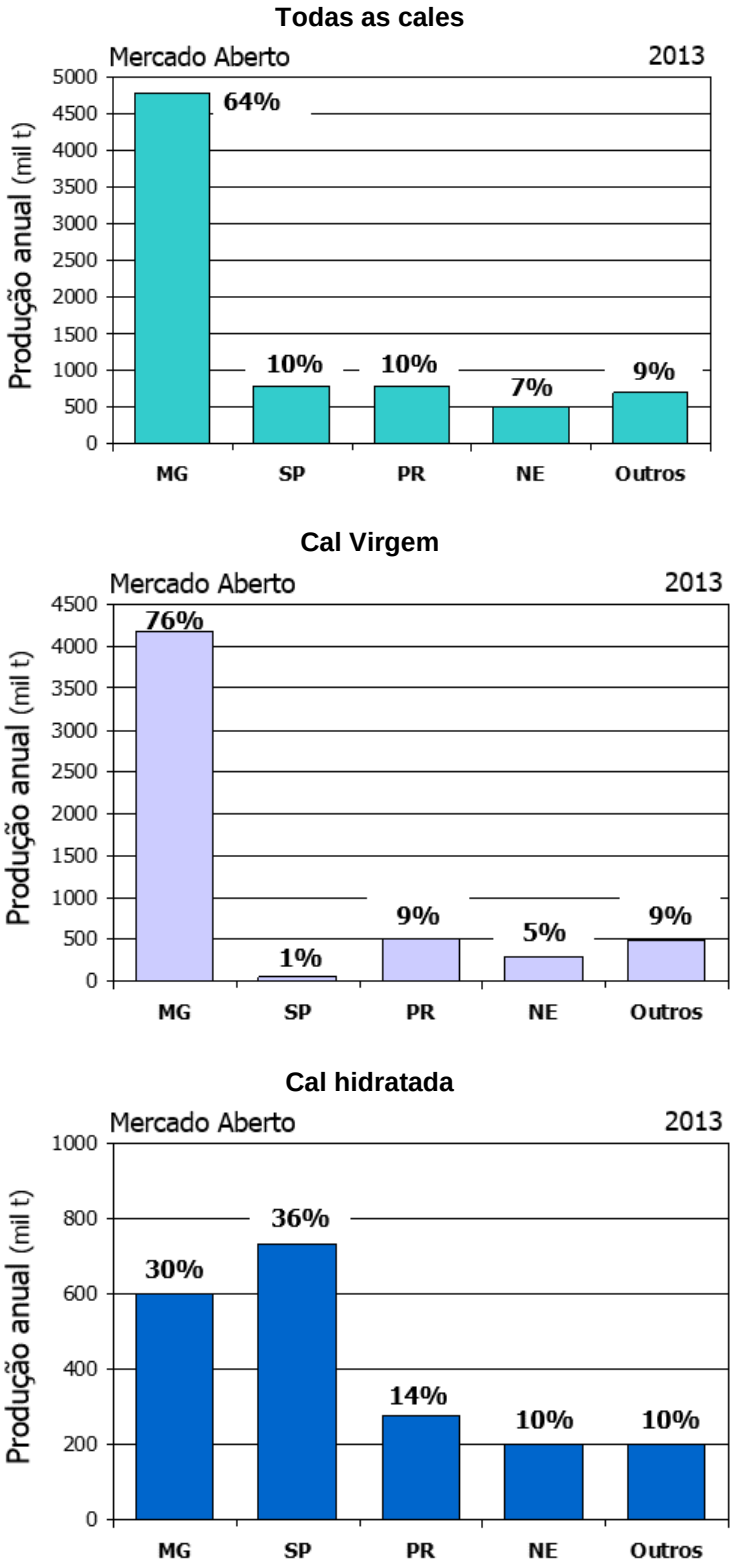
O uso de biomassa (lenha) de florestas plantadas ou resíduos de madeira plantada em substituição a outros combustíveis fósseis ou madeira nativa de fonte ilegal colabora para a mitigação das emissões de carbono. A Votorantim, mesmo com o uso de forno Azbe, emprega gás obtido de madeira plantada. Esta solução não é inovadora, mas é uma estratégia viável que impacta nas emissões de CO_2.

2.2. Distribuição espacial da produção

As principais regiões produtoras de cal no Brasil são o Sudeste e o Sul, com destaque para os estados de Minas Gerais (64% da produção total de cal para o mercado aberto – não cativo), São Paulo e Paraná (10% cada). A produção de cal virgem para o mercado aberto é liderada pelo estado de Minas Gerais (76%), enquanto a de cal hidratada, por São Paulo (36%) (ABPC, 2014b) (Gráfico 2).

Gráfico 2 – Distribuição da produção da cal por estados ou regiões

Fonte de ilustração: (ABPC, 2014b)



As empresas que se destacam no setor da cal no Brasil estão listadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Principais Empresas Produtoras de Cal no Brasil

Empresa	Localização (sede e parque industrial)
Mineração Belocal (Grupo L'hoist)	Minas Gerais, São Paulo, Nordeste
Ical Indústria de Calcinação	Minas Gerias, Rio Grande do Norte
Mineração Lapa Vermelha	Minas Gerais
Votorantim Cimentos	São Paulo, Minas Gerais e outros
Guapiara Mineração Industria e comercio (Minercal)	São Paulo
Mineração Horical	São Paulo
Jungar	São Paulo
Cal Trevo	Sergipe
Frical	Paraná
Cibracal	Paraná
Quallical	São Paulo
Grupo Dagoberto Barcelos	Rio Grande do Sul
Carbomil	Ceará, Rio Grande do Norte

Fonte de referência: (DNPM, 2013)(ABPC, 2014a)

2.3. Evolução da produção, do consumo e do comércio exterior

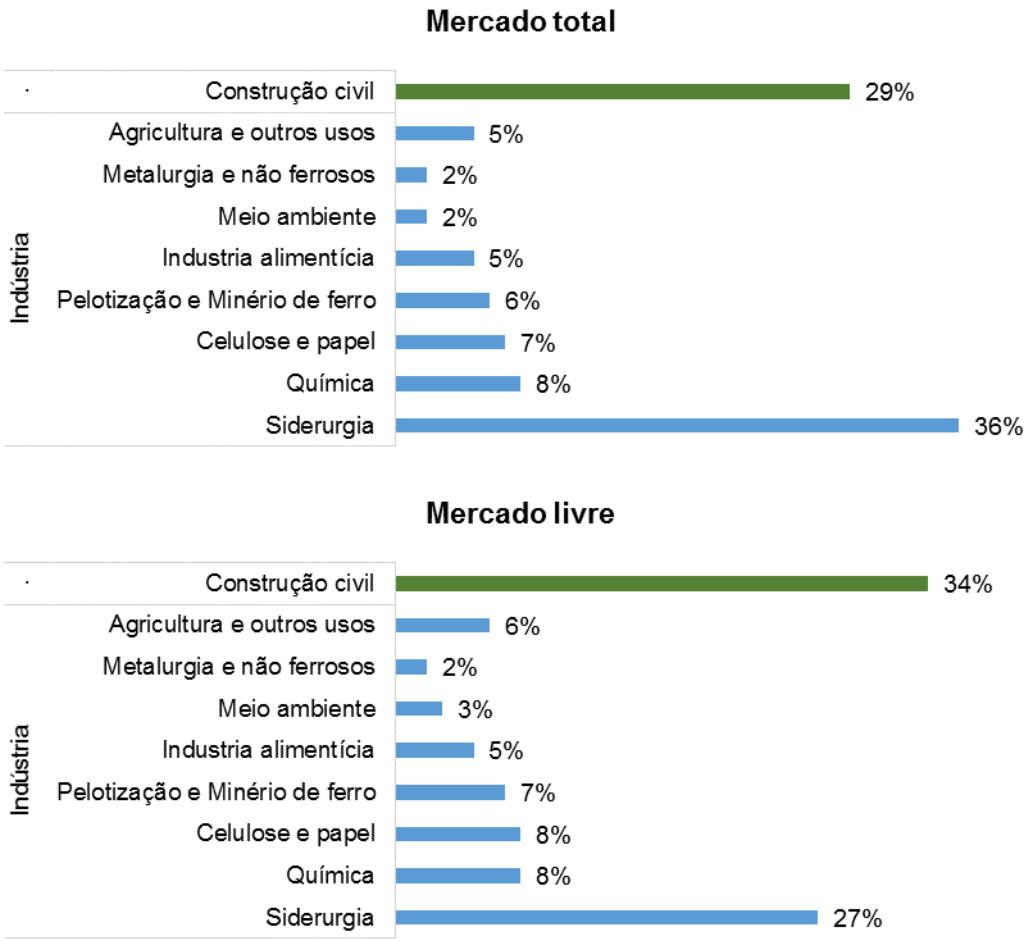
Segundo estimativa da ABPC, a produção total de cal em 2013 foi de 8.419 mil toneladas, sendo 884 mil toneladas (10,5%) destinadas ao mercado cativo e 7.535 mil toneladas (89,5%) ao mercado livre (ABPC, 2014c). A maior parte da produção 6.403 mil toneladas[6] (76%) é referente à cal virgem e 2.016 mil toneladas (24%) à cal hidratada (ABPC, 2014c). A cal virgem destina-se preferencialmente às atividades de siderurgia, mas também é utilizada na construção civil em algumas regiões do país, particularmente o Paraná. A cal hidratada tem a construção como mercado mais relevante, mas também é utilizada em processos industriais variados.

Em 2013, 71% da produção total de cal foi destinada a fins industriais e 29% à construção civil. Considerando apenas o mercado livre, este valores foram de 66% e 34%, respectivamente (ABPC, 2014c). A distribuição percentual estimada de consumo da cal por uso é apresentada no Gráfico 3.

[6] Sendo 5.519 mil toneladas para mercado livre e 884 mil toneladas para mercado cativo (ABPC, 2014c).

Gráfico 3 – Distribuição do consumo da cal segundo aplicações por setor

Fonte de referência: (ABPC, 2014b)



Segundo a ABPC e a USGS, a produção brasileira de cal (virgem e hidratada)[7] em 2013 aumentou 1,3% em relação ao ano anterior (USGS, 2014). Este crescimento ocorreu no período de 2005 a 2013, exceto em 2009, com uma taxa média geométrica de variação do período de 2,4% a.a. (Tabela 4) (Gráfico 4).

O IBGE apresenta números maiores para a produção de cal virgem e hidratada em 2012, ano em que a produção teria atingido 9 milhões de toneladas (Tabela 4). Somando-se a cal para a indústria cimenteira, a dolomita calcinada ou sinterizada e os aglomerados de dolomita, a produção alcançaria 9,3 milhões de toneladas (IBGE, [s.d.]). Em 2005 o IBGE registra uma produção inferior a estimada

[7] Considerado somente cal virgem e hidratada, códigos da CNAE empregados no SIDRA (Sistema de Recuperação Automática) do IBGE: 2392.2030 e 2392.2010 respectivamente.

pela ABPC, o que implicaria em crescimento médio anual da produção total de cal de 9,2% a.a. e ainda maior (12,6% a.a.) especificamente para a cal hidratada. De acordo com os dados do IBGE, a produção de 2012 em relação ao ano anterior teria aumentado mais de 21%, muito acima da variação observada nos quantitativos da ABPC, que foi de 0,9% (IBGE, [s.d.]).

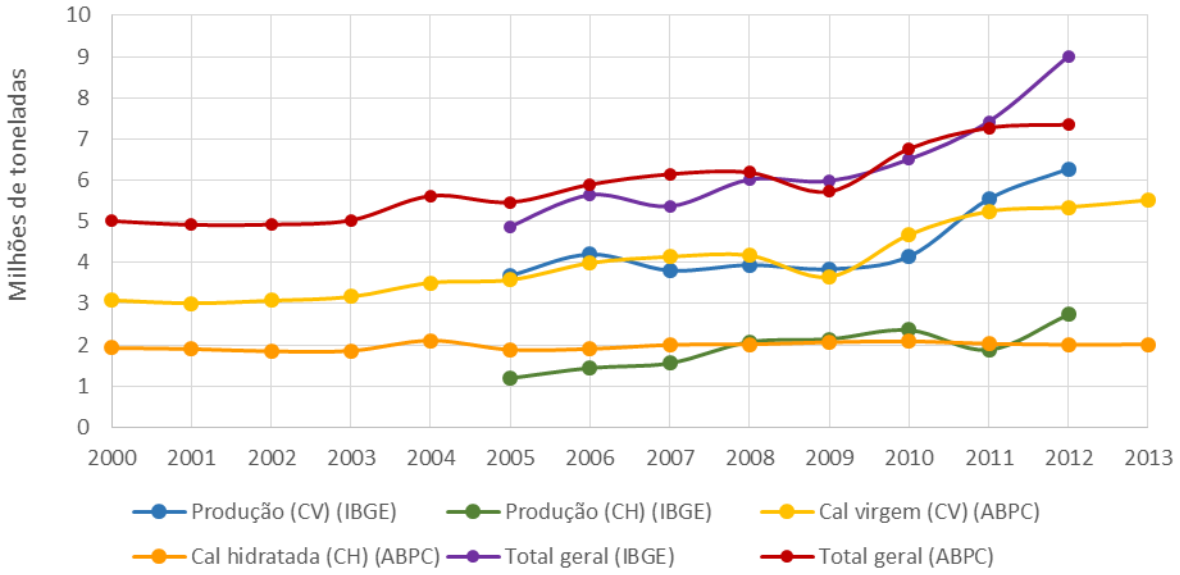
Os dados da ABPC mostram uma tendência de pouco crescimento na produção de cal hidratada (para construção civil) (mediana de 0,5% a.a. desde o ano 2000), que tende a ser suprida pelo aumento da produção de cal virgem (para diversos fins industriais) com crescimento mediano de 3,1% a.a. desde o ano 2000 (Gráfico 4).

Tabela 4 – Quantidade de cal produzida e vendida no Brasil (mil toneladas) de acordo com diferentes fontes.

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Ref.
Quantidade de cal produzida										
CH+CV	-	-	-	7.425	6.600	7.761	8.235	8.300	8.500	(USGS, 2014)
CV	3.685	4.201	3.808	3.942	3.842	4.149	5.544	6.277	-	(IBGE, 2012)
CH	1.192	1.441	1.558	2.073	2.141	2.360	1.882	2.739	-	(IBGE, 2012)
CH+CV	4.877	5.642	5.367	6.016	5.983	6.510	7.427	9.016	-	(IBGE, 2012)
CV	3.581	3.990	4.144	4.171	3.657	4.677	5.243	5.346	5.519	(ABPC, 2014c)
CH	1.885	1.905	2.003	2.016	2.068	2.089	2.029	2.005	2.016	(ABPC, 2014c)
CH+CV	5.466	5.895	6.147	6.187	5.725	6.766	7.272	7.351	7.535	(ABPC, 2014c)
Quantidade de cal vendida										
CV	3.169	3.694	3.643	3.860	2.805	3.776	4.928	5.016	-	(IBGE, 2012)
CH	1.183	1.571	1.491	2.025	2.003	2.222	1.841	2.560	-	(IBGE, 2012)
CH+CV	4.352	5.265	5.134	5.885	4.809	5.998	6.769	7.577		(IBGE, 2012)

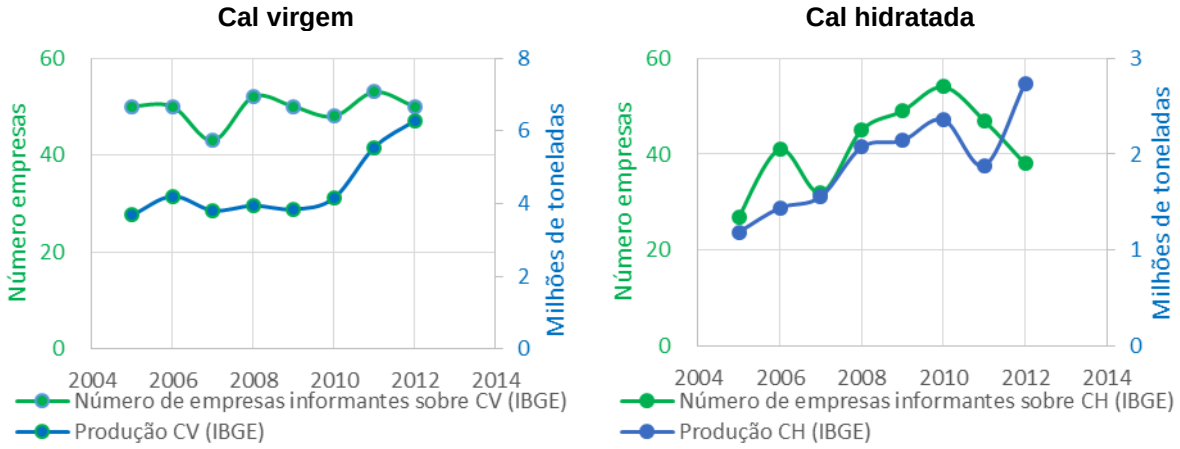
Legenda: CH – cal hidratada, CV – cal virgem

Gráfico 4 – Evolução da produção da cal virgem (CV) e cal hidratada (CH) no Brasil



Os valores de produção publicados pelo IBGE foram desconsiderados para composição dos cenários de avaliação das possibilidades de mitigação de CO_2, pois apresentaram taxa de crescimento médio anual muito acima daquelas consideradas razoáveis pelos profissionais consultados. A causa mais provável dessa taxa de variação tão elevada são as mudanças na base de informantes do IBGE sobre a cal hidratada, que introduzem vieses no dado proveniente dessa fonte (Gráfico 5).

Gráfico 5 – Variação da produção versus número de empresas informantes sobre a produção, dado do IBGE



Fonte de referencia: (IBGE, 2012)

Segundo os valores do IBGE e ABPC (IBGE, 2012)(ABPC, 2014c), as vendas de cal virgem e hidratada seguiram as variações da produção com índice de correlação (r^2) entre 0,92 e 0,95. Entre 2005 e 2012, as vendas da cal virgem ficaram em média entre 11% e 33% abaixo do total produzido, o que pode ser explicado pela importância do chamado mercado cativo.

A alta correlação entre produção e o consumo de cal é explicada pelo fato de o comércio exterior de cal no Brasil ser inexpressivo. A importação brasileira de beneficiados de calcário em 2012 foi de 15,7 mil toneladas (DNPM, 2013), equivalentes a menos de 0,2% da produção nacional[8] no mesmo ano. Segundo o DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral), os principais países de procedência destes produtos foram Uruguai (76,8%) e Argentina (16,7%) (DNPM, 2013).

Uruguai (45%), Argentina (25%) e Paraguai (30%) também foram os principais importadores de semimanufaturados de rochas calcárias (predominantemente cal virgem e hidratada), somando o montante de 4 mil toneladas (referente a 0,05% da produção nacional[9]) (DNPM, 2013). Desta forma, observa-se que as atividades de comércio exterior do setor têm importância irrisória quando comparadas ao mercado interno.

3. IMPACTOS AMBIENTAIS SETORIAIS

3.1. Impactos locais e globais (resíduos sólidos, líquidos e gasosos) e subprodutos

Entre os principais impactos ambientais relacionados à produção da cal estão as emissões de dióxido de carbono (gás de efeito estufa), de outros gases, alto consumo de energia, produção de resíduos, mudança na paisagem devido à mineração, ruído e poeira – incluindo o *lime kiln dust* (pó de forno de cal) (EIPPCB; IPTS, 2013). A seguir descrevem-se de maneira geral os impactos ambientais do setor da cal. Cabe advertir que os itens sobre energia e emissões de CO_2 deste item

[8] Considerado, para o ano de 2012, o valor de 9.301.861 toneladas referentes à produção total de cal segundo o IBGE (IBGE, 2012) que considera aglomerados de dolomita, dolomita calcinada ou sinterizada, cal (hidráulica) para indústria de cimento, cal hidratada e cal virgem.

[9] Considerado, para o ano de 2012, o valor de 9.301.861 toneladas referentes a produção total de cal segundo o IBGE (IBGE, 2012) que considera aglomerados de dolomita, dolomita calcinada ou sinterizada, cal (hidráulica) para indústria de cimento, cal hidratada e cal virgem.

objetivam apenas apresentar a problemática e não definir valores a serem empregados nas projeções de emissões de CO_2 deste estudo. Os valores estimados e empregados são apresentados no item IV.

3.1.1. Resíduos e subprodutos

Segundo EIPPCB (2013), a produção da cal gera resíduos (ou subprodutos) com granulometrias e níveis de descarbonatação não apropriados ao mercado.

Uma fonte destes resíduos é a partida ou desligamento dos fornos para manutenção. O desempoeiramento dos gases de combustão gera *lime kiln dust* (EIPPCB; IPTS, 2013). Na Europa estes subprodutos são equivalentes entre 1% e 5% da produção total de cal (EIPPCB; IPTS, 2013).

De outra parte, há os resíduos provenientes deficiências na calcinação. Temperaturas acima das ideais durante o processo de calcinação formam uma camada superficial de composto de cálcio sinterizado de alta dureza, baixa porosidade, pouco solúvel em água e que, portanto, não irá hidratar no tempo desejado. Por outro lado, temperaturas abaixo das ideais ou tempo de residência abaixo do necessário para o tamanho da partícula não são capazes de completar a descarbonatação, resultando em um núcleo de calcário (QUALICAL, 2014). A cal hidratada CHIII comercializada no Brasil viabiliza a utilização de cal com até 34% de cru.

Uma fonte importante de geração de resíduos são as etapas de mineração e beneficiamento. Estes envolvem minério com composição inadequada para a produção de cal por excesso de contaminantes como sílica, argila, e os finos de britagem, que não podem ser submetidos a calcinação. Estes finos, constituídos de calcário, são beneficiados e destinados a outros mercados, como calcário agrícola, filler ou agregados para construção civil.

Conforme EIPPCB (2013) resíduos de cal com altos teores de sílica, argila ou partículas com granulometria inferior à viável à calcinação podem ser empregados em cobertura de solos contaminados, matéria-prima para a indústria do cimento ou, após moagem, correção do solo para agricultura (EIPPCB; IPTS, 2013).

3.1.2. Outros impactos

Entre os demais impactos ambientais existentes pode-se citar: 1) emissão de poeira ; 2) geração de ruídos e vibração em todas as etapas da produção; 3) consumo de água; 4) odores; 5) mudança da paisagem; 6) emissão de gases, inclusive o NOX (EIPPCB; IPTS, 2013).

A produção de cal emite além do dióxido de carbono outros gases como óxido de nitrogênio, resultante da reação de alta temperatura entre o nitrogênio e o oxigênio no ar de combustão ou da reação dos compostos nitrogenados presentes no combustível com o oxigênio do ar de combustão. As emissões de dióxido de enxofre (SO_2) (entre 0 e 10 kg/t_{cal}) e monóxido de carbono (CO) (entre 0,3 e 12,5 kg/t_{cal}) dependem do tipo de forno e combustível utilizados. Os compostos orgânicos voláteis (COV) são resultantes da queima incompleta de combustíveis, relacionam-se com as emissões de CO e costumam ser baixas. Ainda há a emissão de cloreto de hidrogênio (HCl) (entre $6x10^{-5}$ e 1,3 kg/t_{cal}) (EULA, 2006b)(TWA; CLM, 2007) apud (EIPPCB; IPTS, 2013), fluoreto de hidrogênio (HF), compostos orgânicos, metais pesados[10], dibenzo-p-dioxinas e dibenzofuranos (PCDD / F) e sulfeto de hidrogênio (H2S) (EIPPCB; IPTS, 2013). Os gases são resultantes e variam segundo o tipo de forno, condições de funcionamento, tipos de combustíveis, características da matéria-prima e técnica de redução de emissões empregadas (EIPPCB; IPTS, 2013).

Os ruídos e vibrações são inerentes à atividade de manufatura da cal devido ao uso de maquinário pesado, atividades de extração, moagem, peneiramento, uso de exaustores e vibradores, o próprio carregamento do forno, armazenagem e envio do produto (EIPPCB; IPTS, 2013). O consumo de água dependerá das atividades dentro de cada etapa de produção e do controle na hidratação da cal. Os odores são consequências dos gases efluentes da queima de alguns combustíveis ou do uso de resíduos como fonte energética, tanto em sua manipulação quanto em sua estocagem (EIPPCB; IPTS, 2013). As mudanças na paisagem ocorrem de devido às atividades de mineração.

---

[10] Arsênio, mercúrio, cobalto, zinco, cobre, cádmio, magnésio, telúrio, tálio, vanádio, crômio, antimônio, selênio, cobalto, chumbo (EIPPCB; IPTS, 2013).

A poeira gerada tanto no processo de britagem, transporte, no forno e após a hidratação é um sério problema ambiental que requer filtros nos fornos, estratégias de abatimento de poeira na área de britagem e transporte. Este é certamente o item mais claramente percebido pelas comunidades próximas.

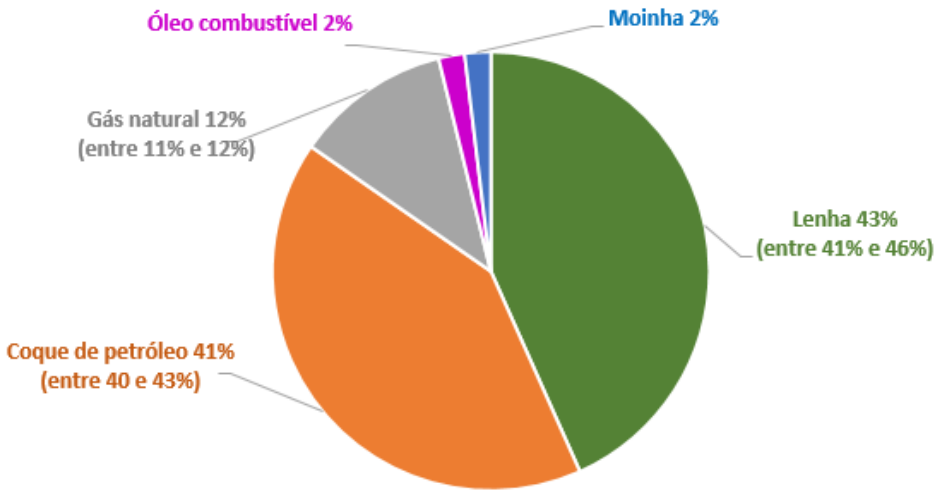
3.2. Fontes de insumos por tipo de forno e etapas do processo

Como visto anteriormente, os fornos de calcinação mais usados no Brasil são: forno de alvenaria (de uma ou múltiplas câmaras), forno rotativo horizontal, forno vertical (tipo Azbe), forno vertical de fluxo paralelo regenerativo (tipo Maerz). Cada forno consome um ou vários tipos de combustíveis e o desempenho depende do tipo de forno e das condições de funcionamento.

Segundo Silva (2009), os combustíveis mais utilizados pelo setor da cal eram coque de petróleo (30%), gás natural (20%), lenha (20%), óleo combustível (20%) e carvão (10%) (SILVA, 2009). No entanto, uma estimativa feita pela ABPC em 2014 mostra que a distribuição energética da produção do setor é 43% de lenha, 41% de coque de petróleo, 12% de gás natural e industrial e 2% de óleo combustível e 2% de moinha (Gráfico 6) (ABPC, 2014c)(ABPC, 2014b).

Gráfico 6 – Distribuição das fontes energéticas da produção de cal - combustíveis utilizados em fornos de calcinação

Fonte de referência: (ABPC, 2014b)



Os fornos tipo Azbe localizados no estado de São Paulo (SP), responsáveis por aproximadamente 10% da produção total de cal no Brasil, em grande parte empregam lenha proveniente de plantações, que não são muito distantes dos locais de produção. Em São Paulo encontram-se fornos adaptados para o uso de madeira

gaseificada. No estado do Paraná, responsável por 10% da produção de total de cal, emprega-se majoritariamente o forno de alvenaria. Estima-se que 90% da produção deste estado utilize madeira neutra em carbono (ver conceito no Box 2), ou seja, resíduos das indústrias madeireiras. Injetores de serragem são adaptações encontradas nos fornos de alvenaria nesse estado. Por outra parte, estima-se que em Minas Gerais cerca de 60% da madeira utilizada seja fonte de carbono (ver conceito no Box 2), enquanto que no Nordeste este percentual seria de 42%. Estima-se que entre 8% e 13% da madeira na matriz energética seja fonte de carbono.

Além dos combustíveis utilizados nos fornos, é necessário somar aos insumos energéticos os combustíveis dos veículos de transporte e equipamentos (britador, perfuratriz, carregadeira, etc.) e a energia elétrica usada nos demais equipamentos empregados no setor.

Dados da União Europeia mostram que a energia térmica consumida na calcinação representa entre 80% e 95% do consumo total de energia para a produção de cal. Esta varia entre 3,2 e 9,2 GJ/t segundo o tipo de forno, podendo chegar a 13GJ/t (em casos específicos) (EIPPCB; IPTS, 2013). A calcinação também consome energia elétrica, entre 5 e 40 kWh/t de cal virgem; a hidratação, classificadores de ar e equipamentos de transporte, entre 5 e 30 kWh/t; e a energia para moagem, entre 4 e 40kWh/t (EIPPCB; IPTS, 2013). A energia elétrica gasta nesta etapas equivale entre 0,05 a 0,4 G J/t, o que é pequeno no montante total de energia gasta para produção de cal. Na Tabela 3 são apresentadas as variações de consumo energético segundo referências internacionais e rota tecnológica.

3.2.1. Energia consumida

Como já se comentou, o processo de fabricação da cal é intensivo em energia na etapa de calcinação, que ocorre em fornos a temperaturas entre 900°C e 1200˚C (EIPPCB; IPTS, 2013).

A decomposição do calcário puro ocorre em torno de 900ºC e a energia necessária é de cerca de 3,1GJ/t. O dolomito ($CaMg.(CO_3)_2$) requer menos energia, em torno de 2,6 GJ/t, inclusive porque a decomposição do carbonato de magnésio ocorre a temperaturas mais baixas.

No Brasil, a quantidade de energia incorporada no processo de produção de cal[11] pode variar entre 2 e 4,4 GJ por tonelada de cal hidratada (PUNHAGUI, 2014). Esta é bastante influenciada pela aceitação na norma de cal de construção que admite até 34% de calcário cru. O consumo de energia difere consideravelmente segundo o tipo de forno. Segundo Silva (2009), um “forno de barranco” consome cerca de 280 kg de óleo combustível por tonelada de cal virgem, enquanto que um forno tipo Maerz despende 89 kg do mesmo combustível para cumprir a mesma função. Se confirmados estes valores, a energia incorporada variaria[12] entre 3 GJ/t e 11 GJ/t.

Nota-se que a melhoria de desempenho dos fornos tem considerável importância na diminuição da energia consumida pelo setor e também nas emissões de CO_2, que podem ser mitigadas adicionalmente pela substituição de combustíveis fósseis por renováveis ou resíduos.

3.3. Emissões de dióxido de carbono

Um impacto importante do processo produtivo em âmbito global é a alta **emissão de dióxido de carbono (CO_2)** que ocorre principalmente na etapa de calcinação devida à descarbonatação do calcário e à queima de combustíveis para geração de energia (calor). Parte importante das emissões de CO_2 são inerentes ao processo de transformação (descarbonatação) e sua proporção em relação à quantidade de produto final (cal virgem) pode ser estimada por meio do cálculo estequiométrico, conforme exemplificado abaixo e estimado no tópico 4.1:

Calcário cálcico: $CaCO_3 + calor = CaO + CO_2$

Calcário dolomítico: $CaCO_3.MgCO_3 + calor = CaO + MgO + 2CO_2$

Com base nos dados do IPCC (1997) (IPCC, 1997) e do Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (MCT, 2010a), a produção de uma tonelada de cal virgem cálcica emite 785 kg de CO_2 e de cal virgem dolomítica, 913 kg de CO_2.

A quantidade de CO_2 emitida por tonelada de cal também depende (i) da temperatura no processo de calcinação e tempo de residência do produto no forno,

---

[11] Desde a mineração até a porta da indústria.

[12] Conversão segundo valores energéticos por tipo de combustível feita com base em parâmetros adotados pelo Balanço Energético Nacional (2013) (MME, 2013a).

que pode fazer variar a fração de calcário decomposto, (ii) do teor de calcário residual, (iii) do teor de óxidos não hidratados; (iv) do conteúdo e natureza das impurezas existentes na matéria-prima; e (v) granulometria da matéra-prima.

As emissões de CO_2 também variam em função do tipo de matéria-prima e de cal que é produzida, pois algumas cales hidratadas para a construção civil podem conter mais de 30% de calcário moído, reduzindo tanto o consumo de energia (e as emissões associadas) quanto as emissões por descarbonatação. Além das emissões pela descarbonatação do calcário deve-se considerar aquelas provenientes da queima de combustíveis no processo de manufatura. O tipo de combustível e quantidade consumida, que depende da tecnologia empregada, interfere nas emissões de CO_2.

Um forno vertical metálico de tanques múltiplos e fluxos paralelos (tipo Maerz), por exemplo, pode consumir até três vezes menos energia[13] que um forno "de barranco" descontínuo para a produção de cal virgem. Neste exemplo, usando a mesma fonte energética (óleo combustível), o primeiro forno emitiria cerca de 262 $kgCO_2/t$ de cal virgem, enquanto o segundo, 823 $kgCO_2/t$[14] pela queima de combustível.

Em muitos empregos da cal, como argamassas de revestimento e estabilização de solos, o CO_2 de processo (da descarbonatação do calcário) é reabsorvido progressivamente. É provável que uma parte significativa seja reabsorvida em curto espaço de tempo.

4. BALANÇO DE CARBONO E INVENTÁRIO DE EMISSÕES DE GEE

O inventário enfoca as emissões de dióxido de carbono, principal gás de efeito estufa emitido pelo setor de cal. Neste item são descritos os métodos de estimação de CO_2 e os valores adotados para a composição de cenários para o ano de 2020 (ver tópico 6).

---

[13] Valores estimados segundo o consumo de combustíveis nos fornos declarado por (SILVA, 2009) e fatores de emissão segundo o (MME, 2013a).

[14] Valores estimados segundo o consumo de combustíveis nos fornos declarado por (SILVA, 2009) e fatores de emissão segundo o (MME, 2013a).

A estimação das emissões de CO_2 considera o carbono liberado por duas fontes: a) **descarbonatação** do calcário, e b) a **queima de combustíveis** no processo de produção da cal. A energia elétrica utilizada nas plantas de manufatura é desconsiderada nos cenários por ser de menor impacto.

4.1. Emissões de CO_2 provenientes da descarbonatação do calcário

As emissões de CO_2 provenientes da descarbonatação foram estimadas por meio de cálculo estequiométrico que considerou os diferentes tipos de cales e as normas brasileiras NBR 6.453 – Cal virgem para construção civil e NBR 7.175 – Cal hidratada para argamassas, que definem teores de óxidos não hidratados, óxidos totais e anidrido carbônico (CO_2), água combinada, assim como mostrado nas Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 5 – Exigências químicas para cal virgem definidas pela NBR 6.453

Tipo de cal	CO_2 (na fábrica)	Água combinada (na fábrica)	Óxidos totais
CV-E	≤ 6%	≤ 3%	≤ 90%
CV-C	≤ 12%	≤ 3,5%	≤ 88%
CV-P	≤ 12%	≤ 3%	≤ 88%

Fonte: (ABNT, 2003a)

Tabela 6 – Exigências químicas para cal hidratada definidas pela NBR 7.175

Tipo de cal	CO_2 (na fábrica)	Óxido não hidratado	Óxidos totais
CH-I	≤ 5%	≤ 10%	≥ 90%
CH-II	≤ 5%	≤ 15%	≥ 88%
CH-III	≤ 13%	≤ 15%	≥ 88%

Fonte: (ABNT, 2003b)

Baseando-se na relação estequiométrica, nos limites máximos de calcário cru (estabelecidos a partir dos limites de CO_2), nas impurezas (insolúveis, como a sílica e outros) e na presença de óxidos não hidratados (Tabela 5 e Tabela 6), e admitindo que todo o calcário cru é constituído de $CaCO_3$ ou dolomito Ca.Mg.2CO3 que CO_2 residual e combinado como carbonato de cálcio, e a fração não hidratada será preferencialmente MgO, as emissões resultantes para a cal virgem variariam entre 464 e 868 $kgCO_2$/t de cal (Tabela 7), e da cal hidratada entre 419 e 694 $kgCO_2$/t de cal (Tabela 8).

Tabela 7 - Emissões de CO_2 da cal virgem ($kgCO_2/t_{produto}$)

		Máximo	Mínimo
Calcítica	CV-E	786	584
	CV-C	670	464
	CV-P	670	468
Dolomítica	CV-E	868	688
	CV-C	789	560
	CV-P	789	564

Tabela 8 - Emissões de CO_2 da cal hidratada ($kgCO_2/t_{produto}$)

		Máximo	Mínimo
Calcítica (pura)	CH-I	614	500
	CH-II	527	499
	CH-III	448	419
Dolomítica	CH-I	694	664
	CH-II	643	574
	CH-III	547	429

Embora se verifique na Tabela 8 que as emissões da cal hidratada CH-III por tonelada de produto sejam menores que as demais, ao se analisar as emissões por toneladas de hidróxidos (parte reativa da cal) os resultados são o oposto (Tabela 9). Desta forma, a simples troca entre CH-I ou CH-II por CH-III não deve ser tomada como estratégia de mitigação. Isto porque quanto menos reativa uma cal maior quantidade de produto para uma mesma função, o que pode variar negativamente no saldo final das emissões de CO_2 (provenientes da descarbonatação) [15]. Por outro lado, quanto menor a energia térmica no processo, maior a quantidade de filler calcário residual na cal.

Tabela 9 - Emissões de CO_2 da cal hidratada ($kgCO_2/t_{hidróxido}$)

		Máximo	Mínimo
Calcítica (pura)	CH-I	705	595
	CH-II	778	595
	CH-III	807	595
Dolomítica	CH-I	771	664
	CH-II	898	782
	CH-III	1007	672

Foram consideradas somente as cales cálcicas e dolomíticas por representarem os extremos de composição presentes no mercado brasileiro. A

[15] O aumento do CO_2 provoca aumento da massa unitária da cal. Quando dosada em volume, como é usual em argamassa, o teor de cal hidratada adicionado cresce significativamente, mais que compensando a redução do teor de hidróxido.

primeira abrange entre 80% e 85% do mercado e a segunda, 15% a 20% (SEABRA, 2014b).

4.2. Emissões de CO_2 provenientes da queima de combustíveis

As emissões de CO_2 provenientes da queima de combustíveis foram estimadas considerando diversas fontes de informação[16] como: dados primários obtidos em entrevistas com a representante de organização setorial e de empresas fabricantes e/ou que comercializam fornos para calcinação, informações sobre processo produtivo de importante empresa[17] produtora de cal no Brasil; e dados secundários resultantes de pesquisa em trabalhos científicos sobre a produção da cal no Brasil, relatórios setoriais e governamentais, portfolios técnicos de fornos para calcinação da cal, informações em sites oficiais das empresas fabricantes de fornos para calcinação de cal.

Foram levantadas informações diretas sobre as emissões de CO_2 para a produção de cal virgem e hidratada e energia gasta na calcinação do calcário, e indiretas sobre os tipos de cal, tipo e quantidade de combustível utilizado, tipos de fornos e matriz energética. Sobre os dados indiretos foram aplicados fatores de conversão de energia e emissão de CO_2 segundo a Tabela 10. Os valores apresentados na Tabela 10 são resultantes da tomada direta ou da média dos fatores encontrados nas referências apresentadas.

Tabela 10 – Fatores de conversão de energia e emissão de CO_2

Combustível		**Energia**	**Emissão**	**Referências**
	Ud	MJ/ud	$kgCO_2$/ud	
Alcatrão	1t	35800	-	(MME, 2013b)
Álcool Etílico Hidratado	1L	21,34	1,47	(GHG PROTOCOL; FGV, 2013) (MME, 2013b) (CETESB, [s.d.])(CETESB, 2010)(GHG PROTOCOL; FGV, 2012)
Biomassa (lenha)	1kg	12,98	1,46	(GHG PROTOCOL; FGV, 2013)
Biomassa (lenha comercial)	$1m^3$	5062,20	567,45	(MME, 2013b)
Biomassa (resíduo madeira)[1]	$1m^3$	2141,70	240,08	(MME, 2013b) (FRANCESCATO; ANTONINI;

[16] (ABPC, 2014c), (ABPC, 2014b), (SEABRA, 2014b), (SEABRA, 2014a), (SEABRA, 2012), (CIMPROGETTI, 2014), (COSTA, 2012), (TAVARES, 2006), (MCT, 2006b), (SILVA, 2009), (MCT, 2010b), (BAJAY, 2010), (APL, 2008), (CIMPROGETTI; SARANDREA, 2013), (HONGKE, 2014), (MAERZ, 2014), (THYSSENKRUPP, 2014).

[17] Sua produção aproximada em 2013 foi de 416 mil toneladas.

				BERGOMI, 2008).
Biomassa (resíduo madeira)[1]	1m^3	5853,98	656,21	(MME, 2013b) (FRANCESCATO; ANTONINI; BERGOMI, 2008).
Biomassa (resíduo madeira em estoque, teor de umidade de 35%)[2]	1kg	11,50	1,29	(MME, 2013b)(EGGLESTON; IPCC, 2006)(FRANCESCATO; ANTONINI; BERGOMI, 2008)
Biomassa (resíduo madeira verde, teor de umidade de 60%)[3]	1kg	6,07	0,68	(MME, 2013b) (EGGLESTON; IPCC, 2006)(FRANCESCATO; ANTONINI; BERGOMI, 2008) (BRAND; MUÑIZ, 2010)
Carvão vapor 3100	1kg	12,35	1,17	(GHG PROTOCOL; FGV, 2013) (MME, 2013b)
Carvão vapor 4200	1kg	16,75	1,58	(GHG PROTOCOL; FGV, 2013) (MME, 2013b)
Carvão vapor 6000	1kg	23,86	2,26	(MME, 2013b)
Carvão vegetal	1kg	28,3	3,02	(GHG PROTOCOL; FGV, 2013)
Coque de carvão mineral	1kg	28,89	2,65	(MME, 2013b)(CETESB, [s.d.])(IPCC, 2011)(GHG PROTOCOL; FGV, 2012)
Coque de petróleo	1kg	35,13	3,30	(GHG PROTOCOL; FGV, 2013) (MME, 2013b)
Energia elétrica	1Kwh	3,6	0,04	(MCT, 2011)(EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2012)
Gás de coqueria	1t	38700	1718,28	(GHG PROTOCOL; FGV, 2013) (MME, 2013b)
Gás natural seco	1m^3	36,846	2,07	(GHG PROTOCOL; FGV, 2013) (MME, 2013b)
Gás natural úmido	1m^3	41,59	2,33	(GHG PROTOCOL; FGV, 2013) (MME, 2013b)
Gasolina	1L	32,22	2,11	(GHG PROTOCOL; FGV, 2013) (MME, 2013b) (MCT, 2006a)(ÁLVARES.JR; LINKE, 2001) (CETESB, 2010)(IPCC, 2011)(GHG PROTOCOL; FGV, 2012)
Gás liquefeito de petróleo	1L	25,56	1,61	(MME, 2013b)(ANP, 2010)(CETESB, [s.d.])(GHG PROTOCOL; FGV, 2012)(IPCC, 2011)
Gás liquefeito de petróleo	1t	46,5	2,93	(GHG PROTOCOL; FGV, 2013) (MME, 2013b) (ANP, 2010)(CETESB, [s.d.])(GHG PROTOCOL; FGV, 2012)(IPCC, 2011)
Lixívia (licor negro)	1kg	11,97	1,13	(MME, 2013b)(GHG PROTOCOL; FGV, 2012)(CETESB, [s.d.])
Óleo combustível BPF	1kg	40,175	3,03	(GHG PROTOCOL; FGV, 2013) (MME, 2013b)
Óleo diesel	1L	35,52	2,68	(GHG PROTOCOL; FGV, 2013) (MME, 2013b) (MCT, 2006a)(CETESB, 2010)(GHG PROTOCOL; FGV, 2012)

Querosene iluminante	1t	43,5	3,13	(GHG PROTOCOL; FGV, 2013) (MME, 2013b)
Pellet madeira - nacional	1kg	18	0,00	(CARASCHI; PINHEIRO; VENTORIM, 2012)(GARCIA, 2010)(COUTO et al., [s.d.])
Pellet madeira - nacional	1m^3	11538	0,00	(CARASCHI; PINHEIRO; VENTORIM, 2012)(GARCIA, 2010)(COUTO et al., [s.d.])
Moinha de carvão vegetal	1kg	19,43	0,00	(MELO et al., 2005)

Para a madeira a conversão de carbono incorporado para emissão de CO_2 foi estimada por meio do fator de multiplicação de 3,67.

[1] Varia segundo o tipo de resíduo (cavaco, madeira picada, entre outros). Proporção utilizada: 1 m^3 de madeira ≈ 1,4 m^3 de troncos ≈ 2 m^3 de madeira picada ≈ 2,5 m^3 de cavaco de madeira fina ≈ 3 m^3 de cavaco de madeira médio (FRANCESCATO; ANTONINI; BERGOMI, 2008).
[2] Teor de umidade máximo/crítico para a queima de biomassa verde (BRAND; MUÑIZ, 2010).
[3] Teor de umidade médio considerado para biomassa estocada (BRAND; MUÑIZ, 2010).

Os valores resultantes do levantamento de dados referenciais sobre o processo de calcinação encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11 – Energia e emissão de CO_2 segundo tipos de cal e fornos - resultante de levantamento de <u>referências nacionais e empresas</u>

	Dados de Empresas				**Dados de referências**			
	Emissão kgCO_2/t		**Energia MJ/t**		**Emissão kgCO_2/t**		**Energia MJ/t**	
	Mín.	**Máx.**	**Mín.**	**Máx.**	**Mín.**	**Máx.**	**Mín.**	**Máx.**
Descarbonatação (somente valores referentes ao cálculo estequiométrico)								
Cal virgem (geral)					750	913		
Cal virgem (calcítica)					750	800		
Cal virgem (dolomítica)					860	913		
Calcinação (somente valores referentes à queima de combustíveis nos fornos)								
Fornos em geral	188	565	3.350	8.374	269	1.475	3.350	13.162
Forno vertical de alvenaria (FV-A)	479	479	5.234	5.234	666	1.475	8.606	13.162
Forno vertical de fluxo paralelo regenerativo (FV-FPR)	188	337	3.350	4.245	269	269	3.576	3.576
Forno vertical de eixo anular* (FV-EA)	213	385	3.800	4.100				
Forno vertical de cuba simples (FV-CS)			5.580	5.860	399	624	5.303	5.568
Forno horizontal rotativo (FH-R)	564	565	4.606	8.374				

* Não identificados no Brasil para produção destinada ao mercado aberto.

Como pode ser visto na Tabela 11 os fornos de fluxo paralelo regenerativo (FV-FPR) são os que gastam menos energia para a calcinação da cal, enquanto que os fornos de alvenaria (ou artesanais) (FV-A) são os que mais consomem energia. Os fornos horizontais rotativos variam seu desempenho segundo a perda de energia pela área superficial – função do comprimento – e da presença ou não de pré-aquecedor – que além de reaproveitar os gases quentes podem reduzir o comprimento do forno e consequentemente a perda pela superfície. A diferença

entre um forno horizontal rotativo (FH-R) com e sem pré-aquecedor pode variar a energia gasta por tonelada de cal virgem de 7.327 a 4.606 MJ, respectivamente (THYSSENKRUPP, 2014). Os fornos de cuba simples (tipo Azbe) encontram-se com desempenho mediano em relação ao consumo energético.

Os combustíveis utilizados nos fornos podem variar muito segundo o modelo empregado, aceitando sólidos, gasosos e líquidos; como o FV-FPR, por exemplo, no qual pode-se utilizar coque de petróleo, óleo, gás liquefeito de petróleo, entre outros (MAERZ, 2014). Os fornos de cuba simples e rotativos também apresentam possibilidade de emprego de diferentes combustíveis, enquanto que nos fornos de alvenaria usa-se primordialmente madeira, seja em forma de lenha ou resíduos diversos da indústria madeireira (restos florestais ou de serrarias).

Segundo dados da ABPC (ABPC, 2014b), no Brasil, o emprego típico de combustíveis por tipo de forno segue da seguinte maneira:

- FV-FPR emprega primordialmente coque de petróleo e moinha de carvão vegetal
- FV-CS emprega primordialmente madeira (lenha e resíduos), em particular gaseificada
- FH-R emprega primordialmente coque de petróleo e moinha de carvão vegetal
- FV-A emprega primordialmente madeira (lenha e resíduos).

Estas, no entanto, são regras gerais. Foi relatado o uso de gás natural para processos de partida de fornos, bem como de outras fontes de biomassa. Existem registros de queima de resíduos industriais perigosos em fornos verticais de alvenarias gerando impactos ambientais importantes.

Já as emissões originadas do consumo de combustíveis em outras atividades como transporte, e eletricidade, são consideradas pequenas. Segundo Bajay (BAJAY, 2010), o consumo específico de energia elétrica é de 15 kWh/t (cerca de 54 MJ/t)[18], que equivale a 0,66 $kgCO_2$/t cal virgem. Estimativas próprias sobre dados primários mostram que no processo de mineração são gastos cerca de 0,31 litros de diesel por tonelada de calcário ($CaCO_3$) extraído (equivalente a 0,56L/t de cal virgem

[18] Valor abaixo de outras referências que explicita faixa de variação de consumo energético.

(CaO) produzida), o que resulta em uma emissão de 0,84 $kgCO_2$/t calcário (ou 1,50 $kgCO_2$/t cal virgem)[19]. Esses valores são pequenos no montante final de emissões de CO_2 da cal.

Desta forma, entendendo que as emissões de CO_2 pela descarbonatação do calcário são inerentes ao processo de produção da cal, e constantes em relação à matéria-prima, as variações nas emissões do setor ficam condicionadas à mudança no desempenho dos fornos e no tipo de combustível empregado, elementos que serão estudados na composição dos cenários para uma economia de baixo carbono.

4.3. Resumo dos valores adotados para a composição de cenários

Na Tabela 12 resumem-se os valores de energia e emissão de CO_2 considerados para o setor da cal.

Tabela 12 – Valores considerados para a composição dos cenários

	Emissão $kgCO_2$/t		Energia MJ/t	
	Mín.	**Máx.**	**Mín.**	**Máx.**
Descarbonatação (somente valores referentes ao cálculo estequiométrico*)				
Cal virgem (geral)	464	868		
Cal virgem (calcítica)	464	786		
Cal virgem (dolomítica)	560	868		
Cal hidratada (geral)	419	694		
Cal hidratada (calcítica)	419	614		
Cal hidratada (dolomítica)	429	694		
Calcinação (somente valores referentes à queima de combustíveis nos fornos)				
Forno em geral	188	1.475	3.350	13.162
Forno artesanal ou de alvenaria (FV-A)	479	1.475	5.234	13.162
Fornos vertical fluxo paralelo regenerativo (FV-FPR)	188	337	3.350	4.245
Forno vertical de cuba simples (FV-CS)	399	624	5.303	5.860
Forno horizontal rotativo (FH-R)	564	565	4.606	8.374

*Cálculos consideraram variações definidas nas normas 7.175 e 6.453 (ver item 4.1)

5. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E MUDANÇA TECNOLÓGICA

Neste item, são apresentados alguns conceitos e tecnologias cujo potencial de mitigação tem sido apresentado em publicações internacionais, particularmente

[19] Conversão entre calcário ($CaCO_3$) e cal virgem (CaO) por relação estequiométrica, onde uma tonelada de cal virgem equivale a 1,79 toneladas de calcário.

no *BAT - Best Available Techniques* da Comunidade Europeia, relatórios setoriais, e documentos de agências ambientais, como o IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change* e outros (EIPPCB; IPTS, 2013), além de publicações cientificas diversas.

Os dados coletados foram objeto de uma análise qualitativa preliminar que procurou analisar a pertinência e viabilidade de certas propostas para a realidade brasileira. A partir disto, serão discutidos quais fatores e tecnologias são viáveis para o setor de cal no Brasil a curto e médio prazos e, portanto, devem ser o foco deste estudo em seu prosseguimento. A seguir, apresenta-se o resultado resumido desse levantamento.

5.1. Novas rotas tecnológicas

5.1.1. Calcinador solar

O calcinador solar diz respeito a um reator solar para efetuar a reação endotérmica da calcinação de partículas de calcário (QUALICAL et al., 2000)(MEIER; GREMAUD; STEINFELD, 2005)(MEIER et al., 2006). Projeto piloto executado, mas não se tem notícia de seu emprego em escala industrial.

Comentário: não pertinente para o momento.

5.2. Redução das emissões de CO_2

5.2.1. Mudança na matriz energética

As emissões de CO_2 pelo uso de combustíveis podem ser diminuídas pelo emprego de combustível com menor teor de carbono, pelo menor uso dos mesmos ou pela troca de combustível fóssil por combustíveis renováveis ou resíduos.

A viabilidade do uso de **resíduos** como combustível em fornos de calcinação depende das propriedades físicas dos combustíveis que podem afetar a qualidade da cal. Segundo EIPPCB (2013) as propriedades físicas dos combustíveis derivados dos resíduos devem ser precisamente definidas. Entre as características estão estado físico, reatividade, poder calorífico e composição química. Para que tenham melhor desempenho, são desejáveis baixo teor de enxofre, cloro, metais e cinzas, e poder calorífico acima dos 18 MJ/kg (EIPPCB; IPTS, 2013). O uso dos resíduos pode ser feito em fornos rotativos, verticais anulares, de fluxo paralelo regenerativo ou outros fornos verticais (EIPPCB; IPTS, 2013).

O uso de biomassa diminui o consumo de combustíveis fósseis. Entre as alternativas de biomassa incluem-se resíduos de madeira (galhos, cavacos, maravalhas, pó de serra ou serragem), casca de arroz, bagaço de cana, casca de coco, sabugo de milho, entre outros (CARPIO et al., 2013). Cabe encontrar aqueles com maior poder calorifico e que se adequem ao tipo de forno. Os pellets de madeira[20] podem ser uma opção, já que são originários de resíduos de madeira de outros processos e contêm poder calorifico superior entre 17 e 22 MJ/kg (LIPPEL, 2014b)(ELBRA, 2014)(BORIM, 2007)(GARCIA; CARASCHI; VENTORIM, 2012).

Deve-se verificar o custo-benefício do uso de resíduos por tipo, avaliando a capacidade de fornecimento local e a eficiência energética.

Comentário: pertinente (prioritário).

5.2.2. Captura e sequestro de dióxido de carbono

A indústria poderia captar CO_2 usando as técnicas de: a) tratamento pós-combustão, onde os gases efluentes passam por um equipamento que separa o dióxido de carbono num reservatório e o restante dos gases é eliminado na atmosfera, ou a separação do CO_2 pode ocorrer por meio de um adsorvente químico; b) combustão com oxigênio puro (oxi-combustão) evitando a formação de gases contaminantes como NOx gerando principalmente H_2O e CO_2; c) e pré-combustão, que se refere à reação de um combustível com oxigênio, ou ar ou vapor para resultar num “gás síntese (syngas)” ou “gás combustível” composto por monóxido de carbono e hidrogênio. Isto ocorre num reator catalítico onde o CO reage com vapor produzindo dióxido de carbono e hidrogênio. Em seguida, o CO_2 é separado por processo de absorção física ou química, resultando num combustível rico em hidrogênio que pode ser usado em muitas aplicações (EIPPCB; IPTS, 2013).

Comentário: interesse remoto devido ao alto custo e inexistência de tecnologia consolidada.

O dióxido de carbono capturado poderia ser usado na produção de carbonato de cálcio precipitado que pode ser resultante da adição de CO_2 na leite da cal

[20] Pellet de madeira é um biocombustível produzido com resíduos de madeira (serragem, maravalha, casca, resíduos de podas ou de construção). O processo produtivo consiste em reduzir a granulometria da matéria-prima, secá-la e comprimi-la em alta pressão até que atinja sua forma final. Entre 6 e 8m^3 de serragem produzem cerca de 1m^3 de pellet. (LIPPEL, 2014a)(WPAC, 2014) (CARASCHI; PINHEIRO; VENTORIM, 2012)(GARCIA, 2010)(COUTO et al., [s.d.])

($Ca(OH)_2$) (CARVALHO; ALMEIDA, 1997) (WEN; XIANG; JIN, 2003)apud(OLIVEIRA; MARTINS, 2009).

Comentário: pertinente (mercado reduzido).

5.3. Aumento da eficiência energética

5.3.1. Uso de fornos eficientes ou modernização de fornos

Segundo EIPPCB (2013), os fornos mais eficientes seriam os verticais ou de fluxo paralelo regenerativo (tipo Maerz) (EIPPCB; IPTS, 2013).

Comentário: pertinente (prioritário).

A modernização de fornos existentes poderia melhorar a eficiência energética do processo. Entre as alternativas estão: a) instalação de permutadores de calor para fornos rotativos longos com o objetivo de recuperar o calor excedente dos gases de combustão ou permitir a utilização de uma gama mais ampla de combustíveis; b) uso do calor excedente dos fornos rotativos para secar a cal proveniente de outros processos, como a moagem; c) conversão de um forno de eixo simples para o desenho da haste anelar ou ligação de um par de fornos verticais para criar um forno de fluxo paralelo regenerativo; d) em casos excepcionais, pode ser econômico encurtar fornos longos rotativos e acoplar um pré-aquecedor para reduzir o consumo de combustível; e) para a diminuição do consumo de energia elétrica, pode-se fazer uso de equipamentos com melhor eficiência energética (EIPPCB; IPTS, 2013).

De modo geral, a otimização da granulometria do calcário, assim como a manutenção e a melhoria do controle do processo podem ajudar a diminuir o consumo de energia (EIPPCB; IPTS, 2013). Como o custo de implantação de novos fornos é alto, as adaptações em fornos existentes que visam seu melhoramento energético são comuns, mas não resultam em equipamentos com o mesmo desempenho de fornos novos (BAHAY; SANT'ANA, 2010).

Comentário: pertinente.

5.3.2. Uso de moinhos eficientes

Durante o processo de moagem pode haver economia de energia elétrica com o uso de equipamentos mais eficientes particularmente moinhos (EIPPCB; IPTS, 2013). Porém, a energia elétrica consumida na produção da cal é pequena

quando comparada à energia proveniente da queima dos combustíveis. As emissões de CO_2 resultantes do baixo consumo de energia elétrica são menores no montante total de emissões de dióxido de carbono.

Comentário: pertinente.

5.3.3. Controle do processo – automação

O controle do processo mais rígido pode melhorar a eficiência energética (EIPPCB; IPTS, 2013). A oferta de calor ideal, por exemplo, é um dos fatores que melhoram o produto e diminuem o consumo de combustíveis.

Comentário: pertinente.

5.3.4. Lavagem do calcário

Segundo EIPPCB (2013), a lavagem do calcário aumenta o espaço livre entre as pedras, melhorando a circulação de ar. Isto diminui a quantidade de ar necessária para combustão e afeta positivamente na redução de energia elétrica (EIPPCB; IPTS, 2013). Acredita-se que a redução do consumo de energia elétrica na produção da cal não exerceria importante impacto nas emissões de CO_2.

Por outro lado, a umidade resultante da lavagem do calcário pode afetar negativamente o processo de calcinação bem como interferir na qualidade da cal (EIPPCB; IPTS, 2013)(SEABRA, 2014a). Menos de 10% dos produtores de cal da União Europeia aplicam este processo (EIPPCB; IPTS, 2013).

Comentário: não pertinente.

5.4. Redução dos resíduos

5.4.1. Diminuição de perdas

Segundo EIPPCB (2013), (EIPPCB; IPTS, 2013) a redução dos resíduos pode ser implementada atingida através da: a) reutilização do material perdido durante transporte, carregamento e descarregamento, manipulação e processamento de matérias-primas; b) reutilização do material coletado nos filtros de tecido, nas plantas de peneiramento, moagem e hidratação ou carregamento; c) diminuição da periodicidade de desligamento de fornos para manutenção, que dependerá do tipo de forno. Note-se que resíduos provenientes do sistema de limpeza dos gases de combustão podem ser usados somente em certas circunstâncias devido à sua

composição química. Por outro lado, o gesso resultante da limpeza dos gases de combustão pode ser utilizado pela indústria de cimento (EIPPCB; IPTS, 2013).

Comentário: pertinente.

5.4.2. Melhoramento do rendimento da matéria-prima

Para melhorar o rendimento do calcário no processo, o EIPPCB (2013) recomenda otimizar a mineração (perfuração e detonação) e as técnicas de processamento da cal. O processamento pode ser feito com a ampliação da gama de tamanhos dos grãos do calcário (EIPPCB; IPTS, 2013).

Comentário: pertinente, mas de baixo impacto em CO_2.

5.5. Redução da emissão de poeira

A diminuição das emissões de poeira pode ser feita por meio de: encapsulamento de operações que geram poeira; transportadores e elevadores cobertos; silos de armazenamento com filtros; sistemas de transporte pneumático; manuseio de materiais dentro de sistemas fechados sob pressão negativa e despoeiramento do ar com aspiração por um filtro de tecido; redução da fuga de ar e pontos de derrame; utilização de dispositivos automáticos e sistemas de controle; manutenção adequada e completa da instalação; utilização de tubos flexíveis de enchimento para carga do caminhão; estoque de material em local fechado; uso de sprays de água em locais secos; sistemas a vácuo; remoção de pó segundo o tipo de forno esteja baseado em filtração, separação de eletrostático e na lavagem úmida; filtros (EIPPCB; IPTS, 2013); promoção do plantio e manutenção de árvores ao redor das áreas de produção; manutenção de boas condições de operação dos equipamentos de controle de poluição do ar para evitar a emissão de material particulado para a atmosfera; altura das chaminés adequadas à promoção da boa dispersão dos poluentes; construção dos dutos de saídas de gases dos sistemas de controle de forma a permitir a realização de testes (SILVA, 2009); pavimentação (EIPPCB; IPTS, 2013) (SILVA, 2009).

Comentário: pertinente.

Tabela 13 - Resumo da avaliação prévia das estratégias para diminuição de impactos na produção de cal

ASSUNTO	COMENTÁRIO
Tecnologia	
Calcinador solar	Não pertinente
Redução das emissões do CO_2	
Mudança de combustíveis	**Pertinente (prioritário)**
Captura de CO_2	Interesse remoto
Aumento da eficiência energética	
Uso de fornos eficientes ou modernização de fornos	**Pertinente (prioritário)**
Uso de moinhos eficientes	Pertinente
Controle do processo – automação	Pertinente
Sistema de recuperação de vapor	Pertinente
Lavagem do calcário	Não pertinente
Redução de resíduos	
Diminuição de perdas	Pertinente
Melhoramento de rendimento da matéria-prima	Pertinente
Redução da emissão de poeira	Pertinente
Fonte de referências: autores	

6. PROJEÇÕES DAS EMISSÕES SETORIAIS DE CO_2 NO BRASIL ATÉ 2020

Como visto no item 4 as principais emissões de CO_2 na produção da cal provêm de duas fontes: a) da descarbonatação da pedra calcária, b) da queima de combustíveis no processo de calcinação. As emissões de dióxido de carbono pela descarbonatação do calcário são inerentes ao processo. Sua variação depende das características físico-químicas do material, considerado um fator não manejável para a diminuição das emissões de carbono. Por outra parte, conforme resumido na Tabela 13, estratégias para a mitigação das emissões de CO_2 do setor da cal devem basear-se, em um primeiro momento, na mudança de combustíveis e tecnologia empregada na calcinação.

Os panoramas para a redução das emissões de CO_2 até o ano 2020 baseiam-se na mudança destes fatores sobre um cenário base, que representa o panorama atual do setor da cal com relação à energia consumida e emissões de CO_2 no processo de calcinação da cal. Para a análise dos impactos nas emissões de dióxido de carbono resultantes da mudança na matriz energética e dos tipos de fornos foram compostos 4 cenários:

- Cenário 1 – Cenário Base. Apresenta o *business as usual* do setor da cal com relação à energia consumida e emissões de CO_2 no processo de calcinação.
- Cenário 2 – Mudança de combustíveis. Avalia os impactos nas emissões de CO_2 pela mudança de combustíveis no processo de calcinação.
- Cenário 3 – Mudança de tecnologia. Avalia os impactos nas emissões de CO_2 e energia pela mudança nos tipos de fornos.
- Cenário 4 – Mudança de combustíveis e tecnologia. Avalia conjuntamente as variações na energia e emissões de CO_2 no setor da cal pela modificação dos combustíveis e tecnologia no processo de calcinação.

Os valores de produção seguem inalterados entre todos os cenários, sendo considerados fatores variantes apenas os tipos de fornos e a matriz energética. Foram consideradas somente as emissões diretas da queima dos combustíveis. Para agregar variações técnicas existentes no setor e apreender o potencial de cada uma das soluções dos diferentes cenários, foi estimada uma faixa de valores limítrofes apresentada em mínimos e máximos.

6.1. Metodologia empregada para a criação dos cenários

A composição dos cenários considerou os **fatores de energia e emissão de CO_2** dos combustíveis definidos na Tabela 10. A quantidade de cal produzida foi determinada segundo valores pronunciados pela ABPC, partindo do ano 2013, quando a produção total de cal no mercado livre foi de 7.535 mil toneladas (5.519 mil toneladas de cal virgem e 2.016 mil toneladas de cal hidratada).

A evolução futura da produção do setor (em massa) foi estimada em função das taxas de crescimento da produção até 2020. Foram consideradas taxas variantes de crescimento anual segundo estimativa descrita no Box 1 e valores adotados apresentados na Tabela 15.

Box 1 – Método empregado para a projeção de demanda setorial

Especificação do modelo

A escolha da especificação para as projeções parte de definição de uma equação de demanda para o agregado do setor de produção de cal (q), considerando que esta é função dos preços reais do setor (p^r), ou seja, os preços setoriais (p) deflacionados pelos preços da economia (P) e também função da renda (y).

$$q(p, P, y) = c\left(\frac{p}{P}\right)^{\alpha_1}(y)^{\alpha_2} \quad (1)$$

Da log-linearização desta equação obtém-se a especificação empírica em (2).

$lnq = \beta_0 + \beta_1 lnp + \beta_2 lnP + \beta_3 lny + \varepsilon$ (2)

A estimação dos parâmetros deste modelo não permite a identificação da elasticidade da demanda com relação aos preços, uma vez que há simultaneidade entre oferta e demanda, induzindo a endogeneidade dos preços. Ainda assim, considerando a renda uma variável predeterminada ($Cov(\varepsilon, y) = 0$), é possível obter uma estimativa consistente da elasticidade da demanda com

relação à renda.

Dados

A base de dados trimestral para o período de 2002T1 a 2014T2 utiliza os seguintes dados conforme as variáveis a seguir:

q: consumo aparente do setor cal, equivalente à produção pois o comércio exterior do setor não é

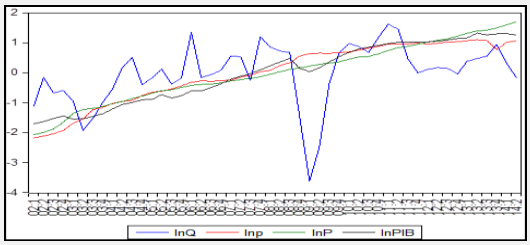
relevante. Assim, foi utilizado o índice de produção física disponível a partir de jan/2002 (CNAE 23.9 aparelhamento de pedras e fabricação de outros produtos de minerais não-metálicos, fonte: PIM / IBGE). Para os resultados em termos do volume de produção foram utilizados os dados de produção (ton) de 2012 (fonte: anuário SGM / MME).

p: Índice de preços construído com base nos preços mensais da cal hidratada para argamassa

(fonte: SINAPI – IBGE / Caixa Econômica Federal).

P: IPCA (fonte: IPEADATA / IBGE).

y: PIB - Índice do valor adicionado a preços básicos dessazonalizado (fonte: BCB).



Metodologia e estimativas do modelo linear

Como pode ser observado no gráfico, as séries apresentam comportamento não estacionário quando individualmente analisadas. Ainda que a quantidade produzida apresente uma volatilidade, a movimentação conjunta sugere uma trajetória de equilíbrio de longo prazo, ilustrativa da cointegração entre as variáveis.

Assim, a estimativa da elasticidade da demanda com relação ao PIB, pode ser obtida por MQO, e pelo método MQO Plenamente Modificados (*Fully Modified Ordinary Least Squares* - FMOLS), adequado para a relação de cointegração, já que incorpora correções para a endogeneidade das variáveis.

Método	Estimativas dos coeficientes e p-valor			
	cte	lnp	lnP	lnPIB
MQO	1.079	-0.250	-0.403	**1.423**
	0.169	0.106	0.075	**0.000**
	R2 ajustado = 0.359			
FMOLS	1.843	-0.292	-0.108	**0.998**
	0.076	0.150	0.711	**0.045**
	R2 ajustado = 0.334			

A metodologia dos modelos de Vetores Autoregressivos (VAR) permite a modelagem da trajetória conjunta das variáveis e projeção da demanda a partir do período corrente. Conforme a discussão de cointegração os modelos de Vetores Correção de Erros (*Vector Error Correction* – VEC) foram testados, porém, o modelo VAR em primeiras diferenças, embora omitindo as correções aos desvios da relação de longo prazo, apresentou melhores resultados em obter a tendência de longo prazo, sendo assim utilizado.

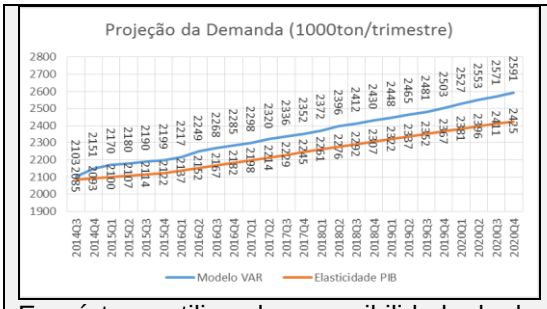
Projeções da demanda

As projeções foram realizadas conforme o cenário para o crescimento do PIB doméstico divulgados pela OCDE:

2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
0.3%	1.4%	2.9%	2.9%	2.8%	2.6%	2.5%

Fonte: handout conference set. 2014 e OCDEStatExtract

O gráfico abaixo apresenta as projeções da demanda setorial a partir das metodologias utilizadas (elasticidade PIB por FMOLS).



Em síntese, utilizando a sensibilidade da demanda com relação ao PIB estimada por FMOLS **(0.99),** a partir da produção do ano de 2012 de **8313** (1000ton), projeta-se o seguinte cenário para o consumo aparente anual de cal em 1000 toneladas.

2014	2015	2016	2017	2018	2019	**2020**
8265	8443	8638	8886	9135	9377	**9613**

Obs.: Os dados de consumo anual aparente acima foram utilizados somente para definir as taxas de crescimento anual empregadas nos cenários e apresentadas na Tabela 15.

Cenário 1 – Cenário base

O cenário 1 apresenta o panorama *business as usual* do setor da cal com relação à **produção, energia e emissões de CO_2**. Os valores de produção partiram de informações da ABPC do ano 2013 (Tabela 4), e consideraram a proporção entre cales virgens e hidratadas e cales calcíticas e dolomíticas, segundo informação da ABPC (SEABRA, 2014b), apresentadas na Tabela 14. As projeções de crescimento da produção resultaram da aplicação das taxas de crescimento anual estimadas (Tabela 15) sobre a produção do ano 2013. Os valores de produção resultantes são apresentados na Tabela 15.

Tabela 14 – Distribuição da produção de cal entre calcítica e dolomítica

	Cal virgem	Cal hidratada
Geral (média)	72,7%	27,3%
Calcítica	80-85%	20-30%
Dolomítica	15-20%	70-80%

Referência: (SEABRA, 2014b)

Tabela 15 – Estimativa de produção de cal até ano 2020

	2013	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**
Taxa de crescimento (%) (adotada)		**2,13%**	**2,15%**	**2,31%**	**2,87%**	**2,80%**	**2,65%**	**2,52%**
Produção total de cal	**7.535**	**7.696**	**7.861**	**8.043**	**8.274**	**8.506**	**8.731**	**8.951**
Produção cal virgem (CV)	5.519	5.637	5.758	5.891	6.060	6.230	6.395	6.556
Produção CV calcítica	4.553	4.650	4.750	4.860	5.000	5.140	5.276	5.409
Produção CV dolomítica	966	986	1.008	1.031	1.061	1.090	1.119	1.147
Produção cal hidratada (CH)	2.016	2.059	2.103	2.152	2.214	2.276	2.336	2.395
Produção CH calcítica	504	515	526	538	553	569	584	599
Produção CH cal dolomítica	1.512	1.544	1.578	1.614	1.660	1.707	1.752	1.796

Embora não entrem na discussão dos cenários, as emissões de CO_2 pela descarbonatação do calcário foram estimadas para melhor conhecimento da situação atual. Estas consideraram a quantidade produzida por tipo de cal (Tabela 15), as emissões de CO_2 por tipo de cal (Tabela 7 e Tabela 8), e as taxas de crescimento (Tabela 15).

Para calcular a energia e emissões de CO_2 pela queima de combustíveis no processo de calcinação da cal no Cenário 1, foi necessário estimar a quantidade de cal produzida por tipo de forno, baseado em informações da ABPC. O valor médio de distribuição foi aplicado sobre a produção total, resultando na quantidade estimada de cal produzida por tipo de forno (Tabela 16).

Tabela 16 – Produção de cal por tipo de forno

Tipos de fornos	**Porcentagem da produção (%)**			**Combustível predominante**	**Produção em 2013 (toneladas)**
	Variante 1	**Variante 2**	**Média**		
FV-A	18%	16%	17%	MA	1.254.795
FV-CS	28%	25%	27%	MA	2.009.380
FV-FPR	42%	46%	44%	C, M, G*, O*	3.332.411
FH-R	12%	13%	12%	C, M, G*, O*	938.414
FV-A + FV-CS	46%	41%	43%	MA	3.264.175
FV-FPR + FH-R	54%	59%	57%	C, M, G*, O*	4.270.825
Total	**100%**	**100%**	**100%**	**-**	**7.535.000**

Legenda:
FV-A: forno vertical de alvenaria, FV-CS: forno vertical de cuba simples (tipo Azbe), FV-FPR: forno vertical de fluxo paralelo regenerativo (tipo Maerz), FH-R: forno horizontal rotativo.
MA – madeira, C – coque de petróleo, M – moinha, G – gás natural seco, O – óleo combustível
* o gás natural e óleo combustível em menor quantidade assim como observado na matriz energética.

Desta forma, a **energia** gasta para a produção de cal resultou da aplicação dos fatores de consumo energético de cada forno (Tabela 12) sobre a massa total produzida. As **emissões de CO_2** pelo processo de calcinação (queima nos fornos) foram calculadas a partir do gasto energético, com o qual se estimou a quantidade de combustível, sobre o qual se aplicou o fator de emissão de CO_2 do combustível. O combustível por tipo de forno considerou a simplificação apresentada na Tabela 16, e os valores de energia e emissão de CO_2 por tipo de combustível consideraram aqueles apresentados na Tabela 10. Os valores mínimos e máximos resultaram da variação de consumo energético por tipo de forno.

Cenário 2 - Mudança de combustíveis

O cenário 2 objetiva avaliar os efeitos nas emissões de CO_2 pela mudança de combustíveis na matriz energética. Os valores de consumo energético por tipo de

forno ficam inalterados para que os efeitos da modificação de um único parâmetro pudessem ser melhores observados e discutidos.

A variação dos combustíveis baseia-se em: a) diminuição do percentual de madeira fonte de carbono, proveniente de mata nativa (de produção não sustentável), por madeira neutra em carbono, proveniente de plantações ou resíduos processados (pellets) e não processados (restos da extração ou processamento da madeira[21]) da indústria madeireira - o conceito de madeira fonte ou neutra em carbono se explica no Box 2; b) mudança integral de coque de petróleo para gás natural seco; c) aumento da moinha ou outro combustível residual proveniente de processos industriais[22] que são neutros em carbono, em detrimento ao coque de petróleo.

Box 2 – Conceito de fonte de carbono e carbono neutro relacionados à madeira

O conceito de carbono neutro presume que a mesma quantidade de carbono absorvido na fotossíntese, incorporada na árvore, será emitida ao final do ciclo de vida, quando a madeira é queimada ou degradada liberando o carbono armazenado de volta à atmosfera. Neste ciclo, o saldo de carbono seria praticamente zero, ou seja, sem efeito emissivo líquido na atmosfera (LUYSSAERT et al., 2008)(JOHN A., 2008)(PUNHAGUI, 2014).
No caso da madeira plantada, o conceito de carbono neutro pode ser empregado, uma vez que esta absorve durante seu crescimento o carbono que que será emitido à atmosfera ao final de seu ciclo de vida.
Isto é bem diferente do que ocorre com madeiras provenientes de fontes não sustentáveis de produção. Ao retirar-se a madeira da floresta nativa de maneira convencional, considerável quantidade de biomassa é destruída convertendo-se em resíduos que por processos de queima ou degradação emitem carbono, revertendo o processo de fotossíntese. Sem a recomposição da biomassa destruída, como é usual em extrações convencionais, o carbono estocado na floresta nativa diminui, aumentando o saldo de CO_2 na atmosfera. Desta maneira, a madeira nativa extraída de forma não sustentável pode ser considerada fonte de carbono, devendo ser contabilizadas as emissões de sua queima ou degradação (PUNHAGUI, 2014).

Cada uma dessas variações é analisada separadamente para evitar interferências no Cenário 2. Os melhores resultados em termos de emissões de CO_2 ou os mais factíveis de serem implantadas foram levados ao Cenário 4, que verifica mudanças conjuntas entre combustíveis e tecnologia dos fornos.

Cenário 3 - Mudança de tecnologia

O cenário 3 objetiva avaliar os efeitos nas emissões de CO_2 e energia pela mudança entre os tipos de fornos. Para que a mudança entre fornos pudesse ser avaliada sem interferências, mantém-se constante o atual percentual estimado de de uso de madeira fonte de carbono (nativa de fonte não sustentável) e os fatores de

[21] Galhos, cascas, maravalha, serragem, pó de serra, micro pó, etc.
[22] Casca de café, casca de arroz, bagaço de cana, etc.

consumo de energia por tipo de forno (Tabela 12). Mudanças na matriz energética são automáticas uma vez que se varia o tipo de forno. Ao considerar que os FV-A e FV-CS utilizam madeira e os FV-FPR e FH-R utilizam coque, moinha, gás natural e óleo, ao diminuir a produção do forno de alvenaria, naturalmente se diminui o uso de madeira na matriz energética. Exceto essa variação automática, outras alterações não foram feitas, ou seja, cada forno mantém os combustíveis inicialmente a ele vinculados (Tabela 16).

A variação nos tipos de fornos baseia-se em: a) mudar todos os fornos verticais de cubas simples (FV-CS) de São Paulo para fornos verticais de fluxo paralelo regenerativo (FV-FPR); b) mudar todos os fornos verticais de alvenaria (FV-A) para fornos verticais de cuba simples, e todos os verticais de cuba simples para verticais de fluxo paralelo regenerativo.

Definiu-se a situação “a” por imaginar que esta seria possível, uma vez que se acredita que as empresas que utilizam FV-CS no estado de São Paulo possam absorver uma nova tecnologia devido a seu porte. A situação “b” foi definida como um cenário de incremento tecnológico a partir da tecnologia previamente utilizada.

Não se considerou a mudança de fornos rotativos, pois na distribuição da produção por tipo de forno são os que têm o menor percentual (12%). Além disto, a cal produzida no FH-R pode apresentar características diferentes daquela produzida no FV-FPR em relação à reatividade.

Figura 7 – Imagem ilustrativa de pedras de cal virgem produzidas por FH-R e FV-FPR

Fonte de referência: (JOHN, 2014)

Cenário 4 - Mudança de combustíveis e tecnologia

O cenário 4 objetiva avaliar os efeitos nas emissões de CO_2 e energia pela mudança conjunta entre os combustíveis e tipos de fornos. Analisa as melhores mudanças efetuadas, estimando as possibilidades de mitigação de CO_2 até 2020.

O cenário 4 é composto por três propostas: a) de curto prazo, onde se diminui o uso da madeira fonte de carbono para 3% a 8%[23] da matriz energética e se aumenta o uso de moinha (ou outro combustível neutro em carbono) para 14%[24] da matriz energética; b) de médio prazo, onde se diminui o uso da madeira fonte de carbono para 0% da matriz energética e aumenta-se o uso de moinha para 23%[25] da matriz energética; c) de longo prazo, onde se diminui o uso da madeira fonte de carbono para 0% da matriz energética, aumenta-se o uso de moinha, ou outro combustíveis neutro em carbono, para 30%[26] da matriz energética e convertem-se os FV-A para FV-CS e os FV-CS para FV-FPR.

6.2. Resultados dos cenários

Cenário 1 – Cenário base

A iniciar no ano 2013, onde a produção de cal foi de 7.535 mil toneladas, tem-se que as emissões pela descarbonatação do calcário foram entre 3.514 e 5.775 $GgCO_2$. Se o mesmo padrão de distribuição da produção fosse mantido até 2020, as emissões por descarbonatação seriam entre 4.174 e 6.860 $GgCO_2$ (Tabela 17). Esses valores, se divididos pelo total de cal produzida (sem distinção por tipo de cal), resultam em emissões entre 466 e 766 $kgCO_2/t$; valores estes dentro da faixa de emissões definida. Estes resultados são apenas para referência, uma vez que não são manejáveis devido à natureza do processo.

As emissões de carbono pela queima de combustíveis nos fornos (processo de calcinação) foi, em 2013, de 1.533 a 2.464 Gg de CO_2. A energia gasta foi entre 32.708 a 50.295 TJ. Se a distribuição da produção por tipo de fornos e a matriz

---

[23] Valores referentes a redução de cinco pontos percentuais da madeira fonte de carbono na matriz energética.
[24] Valor referente a 30% do percentual de coque de petróleo na matriz energética atual, sem mudança de fornos.
[25] Valor referente a 50% do percentual de coque de petróleo na matriz energética atual, sem mudança de fornos.
[26] Valor referente a 50% do percentual de coque de petróleo na matriz energética resultante da nova distribuição dos fornos.

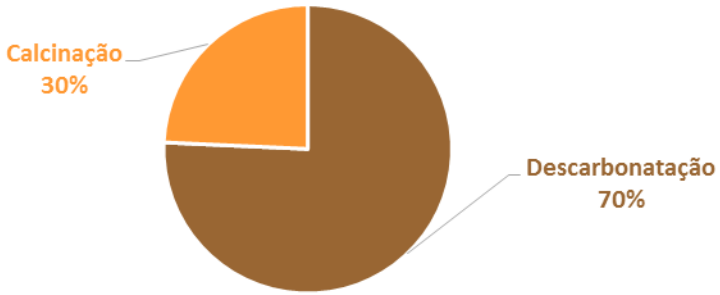
energética fossem mantidas, no ano de 2020, estima-se que a energia gasta para produzir cerca de 8.950 mil toneladas de cal seria entre 38.853 e 59.745 TJ e as emissões de CO_2 entre 1.821 e 2.927 Gg (Tabela 17). Somando as emissões de CO_2 da descarbonatação e calcinação tem-se entre 5.047 e 8.239 $GgCO_2$ pela produção de cal no ano de 2013; e, se mantidas as mesmas condicionantes, esses valores seriam entre 5.995 e 9.787 $GgCO_2$ no ano 2020 (Tabela 17). As emissões da descarbonatação são equivalentes a 70% das emissões totais do setor (Gráfico 7).

Tabela 17 – Resultados do Cenário 1

	Ud	**2013**		**2020**		**Taxa de variação**
Produção	**Mil t**	**7.535**		**8.950**		
		Mínimo	**Máximo**	**Mínimo**	**Máximo**	**Máx./Mín.**
Consumo de energia[1]	TJ	32.708	50.295	38.853	59.745	54%
Emissão de CO_2 pela calcinação[2]	$GgCO_2$	1.533	2.464	1.821	2.927	61%
Emissão de CO_2 por descarbonatação[3]	$GgCO_2$	3.514	5.775	4.174	6.860	64%
Emissão de CO_2 total [4]	**$GgCO_2$**	**5.047**	**8.239**	**5.995**	**9.787**	**63%**

[1] Considerada somente energia térmica na calcinação.
[2] Considerado somente emissão de CO_2 pela queima direta de combustíveis.
[3] Resultado de cálculo estequiométrico, com adoção das variantes normativas, sobre a produção por tipo de cal.
[4] Soma da emissão de CO_2 da descarbonatação e da calcinação.

Gráfico 7 – Percentual das emissões de CO_2 por descarbonatação e calcinação no total das emissões



Como comentado anteriormente, as emissões pela descarbonatação são inerentes ao processo; por isto, ainda que a queima de combustíveis nos fornos seja aproximadamente 1/3 das emissões totais, **a partir deste ponto os cenários serão discutidos sobre os dados de energia e emissão de CO_2 provenientes do processo de calcinação, ou seja, ficam excluídas das discussões dos cenários as emissões de CO_2 pela descarbonatação.**

No padrão de produção atual, a energia gasta no processo de calcinação está entre 4.341 e 6.675 MJ/t de cal e as emissões de CO_2 pela queima de combustíveis

nos fornos estão entre 203 e 327 kgCO_2/t de cal. A faixa de variação da energia consumida na calcinação por tonelada de cal produzida está entre aquela levantada em referências nacionais e internacionais. A faixa de variação das emissões de CO_2 (calcinação), embora dentro da previamente estimada, apresenta mais proximidade aos menores valores para as emissões por queima de combustíveis nos fornos. Isto se deve à quantidade de cal produzida por fornos tipos Azbe e de alvenaria, que utilizam madeira em grande parte neutra em carbono. Estima-se que entre 90% e 100% da madeira empregada na produção de cal no Paraná e São Paulo, respectivamente, seja neutra em carbono (ver item 3.2).

Embora as emissões de CO_2 sejam mais baixas do que algumas referências internacionais devido ao uso de madeira neutra em carbono, isto não se relaciona à eficiência produtiva. Os fornos em alvenaria, por exemplo, ainda que tenham apresentado emissões de CO_2 mais baixas, são ineficientes em termos energéticos. Seu consumo de energia varia entre 5.234 e 13.162 MJ/t, entre 56% e 310% a mais que FV-FPR. Isto significa que ainda que as emissões de CO_2 sejam baixas pelo uso de madeira neutra em carbono, sua ineficiência energética fará com que seja necessária muito mais madeira para uma mesma função. Isto acarreta sobrecarga de demanda de material energético, neste caso, a madeira. Por isto, a análise de possibilidades para uma economia de baixo carbono deve considerar diversos fatores além das emissões de carbono.

Tabela 18 - Resultados do Cenário 1 considerados para discussão dos demais cenários

	ud	2013		2020		Taxa de variação
Produção por tipo de forno	**t**					
Barranco (FV-A)		1.254.795		1.490.576		
Azbe (FV-CS)		2.009.380		2.386.952		
Maerz (FV-FPR)		3.332.411		3.958.586		
Rotativo (FH-R)		938.414		1.114.746		
Total		**7.535.000**		**8.950.860**		
		Mínima	**Máxima**	**Mínima**	**Máxima**	**Máx./Mín.**
Energia térmica	**TJ**					
Barranco (FV-A)		6.567	16.515	7.801	19.619	
Azbe (FV-CS)		10.656	11.775	12.658	13.988	
Maerz (FV-FPR)		11.162	14.146	13.260	16.804	
Rotativo (FH-R)		4.322	7.858	5.134	9.335	
Total		**32.708**	**50.295**	**38.853**	**59.745**	**54%**
Emissão pela calcinação	**$GgCO_2$**					
Barranco (FV-A)		135	567	161	674	
Azbe (FV-CS)		220	404	261	480	
Maerz (FV-FPR)		919	1.165	1.092	1.384	
Rotativo (FH-R)		259	328	307	390	
Total		**1.533**	**2.464**	**1.821**	**2.927**	**61%**

Cenário 2 – Mudança de combustíveis

As emissões derivadas do uso de madeira fonte de carbono podem ser evitadas pela troca da lenha de mata nativa (de fonte não sustentável) por lenha de plantação ou por resíduos da indústria madeireira. O pellet de madeira poderia ser outra opção com emissões próximas a zero.

A diminuição em cinco pontos percentuais[27] no uso de madeira fonte de carbono pode mitigar entre 14% e 16% as emissões de CO_2. Se na matriz energética do setor da cal a madeira utilizada fosse integralmente neutra em carbono, ou seja, 0% de lenha fosse fonte de carbono, as emissões baixariam entre 23% e 39%. Isto sem modificar nenhum outro parâmetro como fornos ou a distribuição dos combustíveis na matriz energética (Tabela 19). A diminuição da madeira fonte de carbono tem relação direta com as emissões de CO_2.

[27] Varia de 8% a 13% na matriz energética para 3% a 8% na matriz energética.

Tabela 19 - Emissões de CO_2 resultantes da substituição de madeira fonte de carbono por madeira neutra em carbono

Fator variado	Ud	2013		2020		Variação em relação ao valor referencial	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Valor de referencia [1]	$GgCO_2$	1.533	2.464	1.821	2.927		
Madeira fonte de carbono na matriz energética = entre 3% e 8%	$GgCO_2$	1.312	2.078	1.558	2.469	-14%	-16%
Madeira fonte de carbono na matriz energética = 0%	$GgCO_2$	1.178	1.493	1.399	1.773	-23%	-39%

[1] Cenário atual, onde a matriz energética é composta por lenha (43%), coque de petróleo (41%), gás natural (12%), moinha (2%) e óleo combustível (2%). Estima-se que a madeira fonte de carbono seja entre 8% e 13% da matriz energética.

Sem mudar o percentual estimado de uso de madeira fonte de carbono, mas substituindo todo o coque de petróleo por gás natural, seria possível baixar as emissões de CO_2 entre 20% e 26%. Neste caso não haveria inversão financeira em mudança tecnológica, mas sim, haveria aumento de custo pela troca entre combustíveis. Este pode ser um fator negativo deste cenário (Tabela 20).

Tabela 20 - Emissões de CO_2 resultantes da substituição integral do coque de petróleo por gás natural

Fator variado	Ud	2013		2020		Variação em relação ao valor referencial	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Valor de referencia[1]	$GgCO_2$	1.533	2.464	1.821	2.927		
Substituição integral do coque de petróleo por gás natural	$GgCO_2$	1.140	1.966	1.354	2.336	-26%	-20%

[1] Cenário atual, onde a matriz energética é composta por lenha (43%), coque de petróleo (41%), gás natural (12%), moinha (2%) e óleo combustível (2%).

Outra opção seria aumentar a quantidade de moinha (ou outro combustível neutro em carbono) em substituição ao coque de petróleo. Conforme se viu na seção 3.2, na matriz energética atual o coque de petróleo é usado por 41% da produção e a moinha por 2%. Se o coque fosse diminuído em 10%, ou seja, o coque passasse a ser 37% da matriz energética e a moinha a 6%, as emissões poderiam baixar entre 5% e 6%. Mas se o mesmo fosse diminuído em 30%, ou seja, passasse a ser 29% da matriz energética e a moinha a 14%, as emissões diminuiriam entre 15% e 19% (Tabela 21). Em muitos casos, a moinha é utilizada em conjunto com o coque, sendo que seu aumento no percentual da mescla não seria de difícil acesso.

Tabela 21 - Emissões de CO_2 resultantes do aumento da moinha (ou outro combustível neutro em carbono) na matriz energética em detrimento ao coque de petróleo

Fator variado	Ud	2013		2020		Variação em relação ao valor referencial	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Valor de referencia [1]	$GgCO_2$	1.533	2.464	1.821	2.927		
Diminuição do coque de petróleo em 10% [2]	$GgCO_2$	1.435	2.340	1.705	2.780	-6%	-5%
Diminuição do coque de petróleo em 30% [3]	$GgCO_2$	1.239	2.092	1.472	2.486	-19%	-15%

[1] Cenário atual, onde a matriz energética é composta por lenha (43%), coque de petróleo (41%), gás natural (12%), moinha (2%) e óleo combustível (2%).
[2] Matriz energética passa a ter 37,2% de coque de petróleo e 6,1% de moinha.
[3] Matriz energética passa a ter 28,9% de coque de petróleo e 14,3% de moinha.

A mudança de combustível mostra-se, portanto, com grande potencial para a redução das emissões de CO_2 do setor. Algumas conversões são de fácil acesso às empresas sem grandes alterações de logística, enquanto que outras podem ser dificultadas pelo fornecimento e custo.

Cenário 3 – Mudança de tecnologia

Os fornos verticais de fluxo paralelo regenerativo apresentam maior eficiência energética e emissões de CO_2 mais baixas. No quesito energético é a tecnologia com melhor desempenho encontrada atualmente para o setor da cal. Nele é possível empregar diversos tipos de combustíveis, entre eles a madeira (com partículas menores que 3 mm (MAERZ, 2014)). Desta forma, as emissões de CO_2 poderiam ser ainda menores se empregados resíduos de madeira, pellets de madeira (de menores dimensões) ou pó de madeira plantada. Acredita-se que no estado de São Paulo, onde grande parte da produção é feita em FV-CS (tipo Azbe), existem empresas capazes de absorver tal tecnologia.

Se toda a produção de cal do estado de São Paulo passasse a ser produzida em FV-RPR em substituição ao FV-CS, seria possível diminuir a energia consumida entre 2% e 4% (Tabela 22), percentuais considerados baixos para a grandeza do investimento. As emissões, por sua vez, aumentariam entre 4% e 8% devido ao uso do coque de petróleo nos FV-FPR (Tabela 22).

Tabela 22 - Emissões de CO_2 e energia consumida resultantes da mudança de FV-CS para FV-FPR no estado de São Paulo

Fator variado	Ud	2013		2020		Variação em relação ao valor referencial	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Emissão de CO_2							
Valor de referencia [1]	$GgCO_2$	1.533	2.464	1.821	2.927		
Mudança de FV-CS para FV-FPR em São Paulo	$GgCO_2$	1.654	2.575	1.965	3.056	+8%	+4%
Energia térmica							
Valor de referencia [1]	TJ	32.708	50.295	38.853	59.745		
Mudança de FV-CS para FV-FPR em São Paulo	TJ	31.285	49.118	37.163	58.348	-4%	-2%

[1] Cenário atual.

Por outro lado, se fosse possível o incremento tecnológico em todos os níveis produtivos do setor, ou seja, toda a produção feita em fornos de alvenaria passasse para FV-CS (tipo Azbe) e toda a produção feita em FV-CS passasse para FV-FPR (tipo Maerz), seria possível uma redução de consumo energético entre 12% e 25% (Tabela 23). As emissões de CO_2 poderiam diminuir 1% ou aumentar até 22% (Tabela 23). Um possível aumento poderia ocorrer uma vez que neste cenário não se considerou a mudança nos combustíveis consumidos por tipo de forno. Assim, a produção de cal feita em FV-CS que operam majoritariamente com madeira neutra em carbono passaria a ser feita em FV-FPR que operam majoritariamente com coque de petróleo.

Tabela 23 – Emissões de CO_2 e energia consumida resultantes da mudança de FV-A para FV-CS e FV-CS para FV-FPR

Fator variado	Ud	2013		2020		Variação em relação ao valor referencial	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Emissão de CO_2							
Valor de referencia [1]	$GgCO_2$	1.533	2.464	1.821	2.927		
Incremento tecnológico em todos os níveis de produção [2]	$GgCO_2$	1.865	2.444	2.215	2.903	+22%	-1%
Energia							
Valor de referencia [1]	TJ	32.708	50.295	38.853	59.745		
Incremento tecnológico em todos os níveis de produção [2]	TJ	28.920	37.929	34.355	45.057	-12%	-25%

[1] Cenário atual.
[2] Mudança de FV-A para FV-CS (tipo Azbe), e de FV-CS para FV-FPR (tipo Maerz).

Este cenário considera a incorporação de aumento de desempenho na produção da cal, que pode ser potencializado pela mudança de combustíveis por tipo de forno.

Cenário 4 – Mudança de combustíveis e tecnologia

Tendo em vista os resultados de mudanças de combustíveis e tecnologia, neste cenário se avaliam ações conjuntas, considerando prazos de implementação. Acredita-se que a curto prazo seria possível diminuir o uso de madeira fonte de carbono em cinco pontos percentuais (o que representaria entre 3% e 8% da matriz energética) e aumentar o uso da moinha, ou outros combustíveis neutros em carbono, em substituição ao coque, para 14,1%[28] da matriz energética. Neste caso, seria possível diminuir as emissões de CO_2 entre 31% e 34% (Tabela 24), sem mudança de tecnologia empregada. Isto não afetaria a estrutura das empresas nem requereria altos investimentos. Por outro lado, seria necessário fortalecer os setores/indústrias fornecedores de tais combustíveis.

Tabela 24 – Emissões de CO_2 resultantes da diminuição de madeira fonte de carbono para 3% a 8% e aumento da moinha para 14%

Fator variado	Ud	2013		2020		Variação em relação ao valor referencial	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Valor de referencia [1]	$GgCO_2$	1.533	2.464	1.821	2.927		
Mudança de combustíveis 1 [2]	$GgCO_2$	1.018	1.707	1.210	2.027	-34%	-31%

[1] Cenário atual, onde a matriz energética é composta por lenha (43%), coque de petróleo (41%), gás natural (12%), moinha (2%) e óleo combustível (2%).
[2] Diminuição da madeira fonte de cabono para 3% a 8% e aumento de combustíveis neutros em carbono em substituição ao coque de petróleo para 14,3% da matriz energética.

Em médio prazo, o aumento do uso da moinha (ou outro combustível neutro em carbono) para 23%[29] da matriz energética e o uso de 100% de madeira neutra em carbono poderiam diminuir as emissões de CO_2 do setor entre 55% e 65% (Tabela 25), sem modificações tecnológicas. Em ambos os casos, não haveria incremento do desempenho energético, o que gera um aumento excedente da demanda de combustíveis.

[28] Diminuindo o coque em 30%, passaria de 41,3% da matriz energética para 28,9%, enquanto que a moinha (ou outro combustível neutro em carbono) passaria de 1,9% para 14,3% da matriz energética.
[29] Diminuindo o coque em 50%, passaria de 41,3% da matriz energética para 20,7%, enquanto que a moinha (ou outro combustível neutro em carbono) passaria de 1,9% para 22,6% da matriz energética.

Tabela 25 – Emissões de CO_2 resultantes da diminuição de madeira fonte de carbono para 0% e aumento da moinha para 23%

Fator variado	Ud	2013		2020		Variação em relação ao valor referencial	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Valor de referencia [1]	$GgCO_2$	1.533	2.464	1.821	2.927		
Mudança de combustíveis 2 [2]	$GgCO_2$	689	873	818	1.037	-55%	-65%

[1] Cenário atual, onde a matriz energética é composta por lenha (43%), coque de petróleo (41%), gás natural (12%), moinha (2%) e óleo combustível (2%).
[2] Diminuição da madeira fonte de cabono para 0% e aumento de combustíveis neutros em carbono, em substituição ao coque de petróleo, para 23% da matriz energética.

A longo prazo, se fosse possível o incremento tecnológico em todos os níveis de produção da cal, ou seja, conversão de FV-A para FV-CS e FV-CS para FV-FPR, acompanhado do uso de 100% de madeira neutra em carbono e o aumento de combustíveis neutro em carbono para 30%[30] da nova matriz energética, seria possível diminuir as emissões de CO_2 entre 29% e 44%; valor menor que a proposta a médio prazo. Porém, a eficiência energética, que não é alterada nas duas propostas anteriores, melhora. Haveria uma diminuição do consumo energético entre 12% e 25% (Tabela 26).

Tabela 26 – Emissões de CO_2 e energia consumida resultantes da mudança de combustíveis e fornos

Fator variado	Ud	2013		2020		Variação em relação ao valor referencial	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Emissão de CO_2							
Valor de referencia [1]	$GgCO_2$	1.533	2.464	1.821	2.927		
Mudança de combustíveis e fornos[2]	$GgCO_2$	1.081	1.370	1.284	1.628	-29%	-44%
Energia							
Valor de referencia [1]	TJ	32.708	50.295	38.853	59.745		
Mudança de combustíveis e fornos[2]	TJ	28.920	37.929	34.355	45.057	-12%	-25%

[1] Cenário atual.
[2] Mudança de FV-A para FV-CS e de FV-CS para FV-FPR; e matriz energética composta por 30% de moinha (ou outro combustível neutro em carbono), 17% de lenha neutra em carbono, 33% coque de petróleo, 17% gás natural, 3% óleo combustível.

Sendo assim, dentro do que é manejável no setor da cal para uma economia de baixo carbono, acredita-se que primeiramente deve-se estimular a mudança de combustíveis, tendo em consideração os prazos de adaptação tanto do produtor

[30] Valor referente a 50% do que seria o percentual do coque na nova matriz energética, resultante da redistribuição dos fornos.

quanto do mercado fornecedor; e em paralelo, deve haver incentivo fiscal e político para mudança tecnológica.

Tabela 27 - Resumo dos resultados dos cenários estudados

		2013		2020		Variação em relação ao valor referencial	
	ud	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
CENÁRIO 1 - Base							
Produção	Mil t	7.535		8.950			
Consumo de energia[1]	TJ	32.708	50.295	38.853	59.745		
Emissão de CO_2 pela calcinação[2]	$GgCO_2$	1.533	2.464	1.821	2.927		
CENÁRIO 2 – Mudança de combustíveis							
Madeira fonte de carbono na matriz energética = entre 3% e 8%	$GgCO_2$	1.312	2.078	1.558	2.469	-14%	-16%
Madeira fonte de carbono na matriz energética = 0%	$GgCO_2$	1.178	1.493	1.399	1.773	-23%	-39%
Substituição integral do coque de petróleo por gás natural	$GgCO_2$	1.140	1.966	1.354	2.336	-26%	-20%
Diminuição do coque de petróleo em 10% [3]	$GgCO_2$	1.435	2.340	1.705	2.780	-6%	-5%
Diminuição do coque de petróleo em 30% [4]	$GgCO_2$	1.239	2.092	1.472	2.486	-19%	-15%
CENÁRIO 3 – Mudança de tecnologia							
Mudança de FV-CS para FV-FPR em São Paulo	$GgCO_2$	1.654	2.575	1.965	3.056	+8%	+4%
Mudança de FV-CS para FV-FPR em São Paulo	TJ	31.285	49.118	37.163	58.348	-4%	-2%
Incremento tecnológico em todos os níveis de produção [5]	$GgCO_2$	1.865	2.444	2.215	2.903	+22%	-1%
Incremento tecnológico em todos os níveis de produção [5]	TJ	28.920	37.929	34.355	45.057	-12%	-25%
CENÁRIO 4 - Mudança de combustíveis e tecnologia							
Mudança de combustíveis [6]	$GgCO_2$	1.018	1.707	1.210	2.027	-34%	-31%
Mudança de combustíveis [7]	$GgCO_2$	689	873	818	1.037	-55%	-65%
Mudança de combustíveis e fornos [8]	$GgCO_2$	1.081	1.370	1.284	1.628	-29%	-44%
Mudança de combustíveis e fornos [2]	TJ	28.920	37.929	34.355	45.057	-12%	-25%

[1] Considerada somente energia térmica. Matriz energética é composta por lenha (43%), coque de petróleo (41%), gás natural (12%), moinha (2%) e óleo combustível (2%). Estima-se que a madeira fonte de carbono seja entre 8% e 13% da matriz energética.
[2] Considerado somente emissão de CO_2 pela queima direta de combustíveis.
[3] Matriz energética passa a ter 37,2% de coque de petróleo e 6,1% de moinha.
[4] Matriz energética passa a ter 28,9% de coque de petróleo e 14,3% de moinha.
[5] Mudança de FV-A para FV-CS (tipo Azbe), e de FV-CS para FV-FPR (tipo Maerz).
[6] Diminuição da madeira fonte de cabono para 3% a 8% e aumento de combustíveis neutros em carbono, em substituição ao coque de petróleo, para 14,3% da matriz energética.
[7] Diminuição da madeira fonte de cabono para 0% e aumento de combustíveis neutros em carbono, em substituição ao coque de petróleo, para 23% da matriz energética.
[8] Mudança de FV-A para FV-CS e de FV-CS para FV-FPR; e matriz energética composta por 30% de moinha (ou outro combustível neutro em carbono), 17% de lenha neutra em carbono, 33% coque de petróleo, 17% gás natural, 3% óleo combustível.

7. DIRETRIZES DE UMA POLÍTICA PÚBLICA SETORIAL PARA A TRANSIÇÃO RUMO À ECONOMIA DE BAIXO CARBONO

O setor da cal pode ser evidenciado pelas emissões de carbono resultantes de seu processo produtivo (mineração, britagem, calcinação e moagem). Parte importante das emissões de CO_2 ocorre durante a calcinação, devido ao processo de descarbonatação da pedra calcária. Esta é aquecida em temperaturas entre 900°C e 1200°C liberando CO_2 e resultando na cal virgem ($CaO+CO_2$). A descarbonatação é parte inerente do processo produtivo e é responsável por cerca de 70% das emissões de CO_2, que estão entre 464 a 868 $kgCO_2/t$ de cal virgem. Sobre estas muito pouco se pode atuar. As variações dependem das impurezas da matéria-prima, teor de óxidos e anidrido carbônico com limites definidos por norma (NBR 6.453 e 7.175). Uma estratégia para reduzir as emissões de CO_2 seria, por meio de normativa, reduzir o teor máximo de não hidratados na cal hidratada.

A redução das emissões de carbono da cal deve focar na fase de calcinação devido à queima de combustíveis, muitos deles fósseis, nos fornos. Outras etapas como mineração e moagem interferem pouco no montante total das emissões de dióxido de carbono, bem como a energia elétrica. As emissões de carbono resultantes da queima direta de combustíveis nos fornos de calcinação estão entre 188 e 1.475 $kgCO_2/t$ de cal virgem.

No Brasil o setor da cal é heterogêneo. Há variações no porte das empresas, tecnologia empregada e qualidade dos produtos. Assim, os resultados de emissão de CO_2 e energia consumida são apresentados em faixa de variação (entre mínimos e máximos) que delimitam as possíveis resultantes de diferentes composições entre insumos e tecnologias, demarcando o panorama nacional. Ainda que o foco para a mitigação das emissões de CO_2 esteja nos fornos e combustíveis utilizados, o desempenho das estratégias depende das particularidades do setor.

No Brasil são encontrados fornos de alvenaria (artesanais) com baixo controle de processo e energeticamente pouco eficientes, bem como, fornos verticais de fluxo paralelo regenerativo, considerados, atualmente, os mais eficazes com relação ao consumo energético. Na matriz energética utiliza-se combustíveis fósseis como coque de petróleo, bem como, combustíveis renováveis como a madeira plantada ou residual e a moinha. A relação entre tecnologia e tipo combustível varia segundo a

empresa, mas de modo genérico pode-se desenhar o setor considerando tais fatores por região.

Sobre a caracterização setorial nacional, avaliou-se possíveis estratégias de mitigação das emissões de CO_2 que basearam-se na mudança de tecnologia (fornos) e/ou combustíveis. Foram estudados três cenários, onde o primeiro avalia somente mudanças na matriz energética; o segundo, mudanças de tecnologia; e o terceiro, mudanças de tecnologia e combustíveis.

Os resultados indicaram que alterações nos combustíveis utilizados tem grande potencial para a redução das emissões de CO_2 provenientes da fase de calcinação, enquanto que variações de fornos teriam menor influência. A permuta entre combustíveis fósseis por neutros em carbono diminui consideravelmente as emissões de CO_2. Se acredita que a implementação desta estratégia seja não somente viável mas de rápida absorção pelo setor uma vez que não exige modificações tecnológicas consideráveis; e que parte da produção já é feita com uso deste tipo de insumo energético.

Devido a este fato, a mudança tecnológica proposta, que trocaria fornos de alvenaria (FV-A) por fornos de cuba simples (FV-CS), e estes, por fornos de fluxo paralelo regenerativo (FV-FPR), traz menos benefícios em termos de emissão de carbono. Isto porque, no Brasil, boa parte da produção de cal feita em FV-A e FV-CS utilizam madeira neutra em carbono como combustível. A mudança de um FV-CS movido a madeira plantada (gaseificada), como ocorre no estado de São Paulo por exemplo, por um FV-FPR movido majoritariamente com coque de petróleo, aumentaria as emissões de CO_2. Por outro lado, sem mudança tecnológica não há melhora do desempenho energético o que aumenta desnecessariamente a demanda por combustíveis.

Desta forma, acredita-se que para implantar uma **economia de baixo carbono no setor da cal no Brasil** deve-se em um primeiro momento **incentivar o uso de combustíveis neutros em carbono**, como resíduos de outros processos produtivos ou madeira plantada. Para isto seria necessário apoiar pesquisas para o aproveitamento de biomassa (residual ou não), implantação de indústrias para o processamento de resíduos industriais (se necessário, como o caso do pellet de madeira), possíveis adaptações tecnológicas necessárias ao uso do novo

combustível, organização logística entre fornecedores e consumidores, e a indústria madeireira (preferencialmente a silvicultura).

Outra estratégia subsequente seria apoiar **a implantação de fornos energeticamente eficientes**, promovendo a redução dos fornos de alvenaria (artesanais) e a modernização dos fornos verticais de cuba simples para fornos verticais de fluxo paralelo regenerativo. Para isto seria necessário apoio financeiro aos industriais e políticas públicas.

A implantação de tais estratégias depende de políticas públicas e associação público-privado, e prazo de implementação sujeita-se à qualidade dos projetos propostos que estão vinculados ao diálogo com instituições setoriais e aos interesses e capacidade de investimento dos industriais, bem como, da agilidade do governo e instituições financeiras na proposição de ações estratégicas.

BIBLIOGRAFIA

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6453:2003. Cal virgem para construção civil - requisitos.**ABNT, 2003a.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7175:2003. Cal hidratada para argamassas.**ABNT, 2003b.

ABPC - Associação Brasileira dos Produtores de Cal. **Associação Brasileira dos Produtores de Cal**. Disponível em: <http://www.abpc.org.br/frame.htm>. Acesso em: 5 jul. 2014a.

ABPC - Associação Brasileira dos Produtores de Cal. **Visão Geral do Setor da Cal**, ago. 2014b.

ABPC - Associação Brasileira dos Produtores de Cal. **Documento para coleta de dados: destinado à ABPC**Mauro Adamo Seabra, 15 ago. 2014c.

ÁLVARES.JR, O. DE M.; LINKE, R. R. A. **Metodologia simplificada para cálculo das emissões de gases do efeito estufa das frotas de veículos no Brasil.**CETESB, 2001. Disponível em: <www.ambiente.sp.gov.br/proclima/PDF/inventario_efeitoestufa.pdf>

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - 2010**. Rio de Janeiro: Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (Brasil), 2010.

APL - Arranjos Produtivo Local - Cal e Calcário do Paraná. **Matrizes energéticas alternativas para industrualização da cal no Paraná. Projeto Fortalecimento tecnológico do APL de cal e calcário do Parnaá. Meta física III.** Curitiba: [s.n.]. v. III

BAHAY, S. V.; SANT'ANA, P. H. DE M. **Oportunidades de eficiência energética para indústria. Relatório setorial. Cal e gesso.** Brasilia: CNI, Procel, Eletrobras, 2010.

BAJAY, S. V. **Oportunidades de eficiência energética para a Indústria: relatório setorial: cal e gesso**. Brasilia: CNI, 2010.

BORIM, G. V. **Resultado da Análise - Pellet**Esalq. Departamento de Ciências Floretais. Universidade de São Paulo, , 5 fev. 2007. Disponível em: <http://www.madersul.com.br/Downloads/Pelletbraz/Analise_Pellet_LQCE.pdf>

BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B. DE. Influência da época de colheita da biomassa florestal sobre sua qualidade para a geração de energia. **Sciencia Florestalis**, v. 38, n. 88, p. 619–628, 2010.

CAL OESTE. **Forno calcinação. Cal Oeste.** Disponível em: <http://www.caloeste.com.br/flex/foto_topo/fotos/img/14/Imagem%20057%20modified_img.jpg>. Acesso em: 17 ago. 2014.

CARASCHI, J. C.; PINHEIRO, D. G.; VENTORIM, G. **Caracterização física e química dos pellets de madeira produzidos no Brasil.** XIII Ebramem. **Anais**...Vitória-ES: EMBRAMEM, a 25/07 2012Disponível em: <http://www.abipel.com.br/media/doc/CARACTERIZACAO_FISICA_E_QUIMICA_DOS_PELLETS_DE_MADEIRA_PRODUZIDOS_NO_BRASIL_XIII_EBRAMEM.pdf>

CARPIO, R. C. et al. Estado da arte do processo produtivo da cal na região Centro Oeste de Minas Gerais. **ForScience**, v. 1, n. 1, p. 74–85, 11 nov. 2013.

CARVALHO, E. AUGUSTO DE; ALMEIDA, S. L. M. DE. **Caulim e carbonato de cálcio: competção na indústria de papel**MCT, CNPq, CETEM, , 1997. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/publicacao/series_sed/sed-41.pdf>

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **1°Relatório de Referência do Estado de São Paulo de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, período de 1990 – 2008. Inventário das Emissões de CO2 por queima de combustíveis no Estado de São Paulo, 1990 a 2008: Abordagem de Referência (Top Down)**. São Paulo: CETESB, 2010.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Inventário de emissões de CO2. Manual de preenchimento.** São PAulo: CETESB, [s.d.].

CIMPROGETTI. **Submitted form**, 1 set. 2014.

CIMPROGETTI, C. L. T. **Reference List Main Lime Burning**, dez. 2012. Disponível em: <http://www.fmw.co.at/docs/de_Referenzliste_Schachtoefen.pdf>

CIMPROGETTI; SARANDREA, L. **Lime and Lean Gases**, ago. 2013.

COÊLHO, J. **Calcario Santa Maria do Cambucá - PE - Rit TV Programa Revista do Campo.**, 15 mar. 2013. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=2iMgWVUU-qs>. Acesso em: 7 ago. 2014

COSTA, B. L. DE C. **Quantificação das emissões de CO2 geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, fev. 2012.

COUTO, L. et al. **Produção de pellets de madeira : o caso da Bio-Energy no Espírito Santo**. Texto. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/catalogo/REC000g823wk6z02wx5ok0u5nfpm9q5j9on.html>. Acesso em: 8 nov. 2014.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2013. Cal.**David de Barros Galo, 2013. Disponível em: <https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=8970>

ECHA - European Chemicals Agency. **Calcium dihydroxide**. Disponível em: <http://apps.echa.europa.eu/registered/data/dossiers/DISS-9eaebe88-3dab-1715-e044-00144f67d031/AGGR-c0185199-38f6-4eeb-9847-bb362953630e_DISS-9eaebe88-3dab-1715-e044-00144f67d031.html#section_3_5>. Acesso em: 14 ago. 2014.

EGGLESTON, H. S.; IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 **IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 1 Introduccion.** Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.

EIPPCB; IPTS. **Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide.** European Union: [s.n.].

ELBRA, Energia Limpa do Brasil. **Pellet**. Disponível em: <http://www.elbra.ind.br/pellet.php>. Acesso em: 16 ago. 2014.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional 2012: Ano base 2011**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2012. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf>.

EU - European Union. L100. Official Journal of the European Union. ISSN 1977-0677. 9 mar. 2013, p. 52.

EULA. **Draft lime sector Chapter 2.1 and 2.2**, 2006a.

EULA. **Draft lime sector Chapter 2.3 and 2.4 and additional information on these chapters**, 2006b.

FRANCESCATO, V.; ANTONINI, E.; BERGOMI, L. Z. **Wood Fuels Handbook (UK). BiomassTrade Centres**. [s.l.] AIEL - Italian Agriforetry Energy Association, 2008.

GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil**. Dissertação de mestrado—Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, 2010.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. **Caracterização energética de pellets de madeira**. In: 7° CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA. São Paulo: 5 nov. 2012

GHG PROTOCOL; FGV. **Programa Brasileiro GHG Protocol. Arquivo em excel. Fatores de conversão.** Disponível em: <http://www.fgv.br/ces/ghg/>. Acesso em: 31 out. 2011.

GHG PROTOCOL; FGV, F. G. V. **Programa Brasileiro GHG Protocol. Ferramenta GHG Protocol 2013. Versão 2013.1.** Disponível em: <http://www.ghgprotocolbrasil.com.br/index.php?r=site/CapaSecao&id=1>. Acesso em: 1 nov. 2014.

HONGKE, H. M. **Lime Kiln**. Disponível em: <http://www.rotarykilnhk.com/24-Lime_Kiln>. Acesso em: 8 nov. 2014.

IABR - Instituto Aço; CST. **Notícias do setor - CST fecha contrato com Grupo belga Lhoist.** Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/imprensa/noticias.asp?id=300>. Acesso em: 14 jul. 2014.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **SIDRA-Sistema IBGE de Recuperação Automática. Indústria. Pesquisa Industrial Anual (2005-2012)**. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=3466&z=t&o=22>. Acesso em: 14 jul. 2014.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **SIDRA - Sistema IBGE de Recuperação Automática**. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: 14 ago. 2014.

ICAL, M. **ICAL - Vídeo Institucional**, 12 mar. 2013. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=2PjgmKh1yU0&feature=youtube_gdata_player>. Acesso em: 17 ago. 2014

IEA - Internacional Energy Agency. **Tracking industrial energy efficiency and CO_2 emissions: in support of the G8 plan of action: energy indicators**. Paris, France: International Energy Agency, 2007.

IFC - International Finance Corporation; WBG - World Bank Group. **Environmental, Health, and Safety Guidelines for Cement and Lime Manufacturing**IFC, WBG, , 30 mar. 2007. Disponível em: <http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/f74848804951d04eb75cb719583b6d16/Final+-+Cement+and+Lime+Manufacturing.pdf?MOD=AJPERES>

ILA - International Lime. **Uses of lime**. Disponível em: <http://www.internationallime.org/uses.html>. Acesso em: 13 ago. 2014.

IPCC - - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Bracknell: JT Houghton, LG Meira Filho, B Lim, K Treanton, I Mamaty, Y Bonduki, 1997. v. Workbook. Module I. Energy

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Carbon metrics**. Disponível em: <http://www.carbonmetrics.com/ipcc-emission-factors-tool>. Acesso em: 31 jan. 2011.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change.. Chapter 2 - Mineral Industry Emissions. In: **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 3. Industrial Processes and Product Use.** 1. ed. Japan: IGES- Institute for Global Environmental Strategies, 2006. v. 3.

JOHN A., M. Carbon-negative biofuels. **Energy Policy**, v. 36, n. 3, p. 940–945, mar. 2008.

JOHN, V. M. **Imagens visita empresa Lhoist**, 24 out. 2014.

LAPA VERMELHA. **Calcário**. Disponível em: <http://www.lapavermelha.ind.br/produtos.htm>. Acesso em: 17 jul. 2014.

LIPPEL. **Fábrica de Pellets**. Disponível em: <http://www.lippel.com.br/br/unidades-de-producao/usina-de-combustivel-solido/fabrica-de-pellets.html#.VImNNsl0XVo>. Acesso em: 11 dez. 2014a.

LIPPEL. **Pellets de biomassa**. Disponível em: <http://www.lippel.com.br/br/sustentabilidade/pellets-de-biomassa#.U-_czmMR7Ks>. Acesso em: 16 ago. 2014b.

LUYSSAERT, S. et al. Old-growth forests as global carbon sinks. **Nature**, v. 455, n. 7210, p. 213–215, 2008.

MAERZ, O. A. **Maerz Ofenbau AG – The world leader in lime kilns. Product Portfolio.** Disponível em: <http://www.maerz.com/incEN.php?show=products>. Acesso em: 8 nov. 2014.

MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia. **Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Relatório de Referência. Emissões de Gases de Efeito Estufa por Fontes Móveis, no Setor Energético.** Brasília: MCT, 2006a.

MCT- Ministério de Ciência e Tecnologia. **Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Relatório de Referência. Emissões de Gases de Efeito Estufa por Fontes Móveis, no Setor Energético.** Brasília: MCT, 2006b.

MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia. **Segundo inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa relatórios de referência emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais - produtos minerais. Parte II. Produção de Cal. Outros Usos do Calcário e Dolomita. Produção e Uso de Barrilha.** Brasilia: MCT, 2010a.

MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia. **Segundo inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa relatórios de referência emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais - produtos minerais. Parte II. Produção de Cal. Outros Usos do Calcário e Dolomita. Produção e Uso de Barrilha.** Brasilia: MCT, 2010b.

MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia. **Programa Nacional de Mudanças Climáticas. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Fatores de Emissão. Arquivos de Fatores de Emissão**. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html#ancora>. Acesso em: 24 out. 2011.

MEIER, A. et al. Solar chemical reactor technology for industrial production of lime. **Solar Energy**, Solar Power and Chemical Energy Systems (SolarPACES'04) International Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems. v. 80, n. 10, p. 1355–1362, out. 2006.

MEIER, A.; GREMAUD, N.; STEINFELD, A. Economic evaluation of the industrial solar production of lime. **Energy Conversion and Management**, v. 46, n. 6, p. 905–926, abr. 2005.

MELO, F. A. DE O. et al. Avaliação de uma fornalha para aquecimento direto de ar utilizando moinha de carvão. **SBICafé**, 2005.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Balanço Energético Nacional 2013: Ano base 2012**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia - Empresa de Pesquisa Energética, 2013a.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Balanço Energético Nacional 2013: Ano base 2012**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia - Empresa de Pesquisa Energética, 2013b.

OLIVEIRA, F. V.; MARTINS, A. H. Calcium carbonate precipitation for industrial application. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 62, n. 2, p. 175–183, jun. 2009.

PANORAMIO. **Antigos Fornos Para Produção de Cal - Botuverá-SC**. Disponível em: <http://www.panoramio.com/photo/50485942>. Acesso em: 17 ago. 2014.

PETROBRÁS. **Coque Verde de Petróleo: Menor Impacto Ambiental - Petrobras**. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/produtos/industriais/coque-verde-de-petroleo/>. Acesso em: 16 ago. 2014.

PUNHAGUI, K. R. G. **Potencial de reducción de las emisiones de CO2 y de la energía incorporada en la construcción de viviendas en Brasil mediante el incremento del uso de la madera.** PhD Thesis (to be published)—Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya y Universidade de São Paulo, 2014.

QUALICAL et al. **The Solar Production of Lime. 2000-2003 Research Program.**Qualical, , 2003 2000. Disponível em: <http://www.pre.ethz.ch/publications/0_pdf/Brochure_Solar_Production_of_Lime.pdf>

QUALICAL. **Cal hidratada e cal virgem**Qualical, , 2014. Disponível em: <http://www.quallical.com.br/Apostila%20cv.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2014

SEABRA, M. A. **Responsabilidade Socioambiental no Setor da Cal. Programas Institucionais da ABPC para qualificação de Produtores de Cal**. Apresentação apresentado em VII ERUR - Encontro de Refrataristas e Usuários de Refratários. Refratários para a Industria de Cimento e Cal. Curitiba, out. 2012. Disponível em: <http://ibar.com.br/refratarios/Refratario/DIA%2018OUT/05.ABPC.pdf>. Acesso em: 7 maio. 2014

SEABRA, M. A. **Setor da cal**, 25 jul. 2014a.

SEABRA, M. A. **Dados da produção desagregados entre cal virgem e hidratada**, 3 nov. 2014b.

SEMGRH, D. **Calcário extraído em Jatapu pode ser suficiente para atender o Amazonas - notícias em Amazonas**. Disponível em: <http://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2012/12/calcario-extraido-em-jatapu-pode-ser-suficiente-para-atender-o-amazonas.html>. Acesso em: 16 ago. 2014.

SILVA, A. C. **Estudo e otimização da reação de hidratação do hidróxido de cálcio**. Dissertação de mestrado—Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

SILVA, J. O. DA. **Produto RT 72. Perfil da Cal.** [s.l.] MME - Ministério de Minas e Energia; Banco Mundial; J. Mendo Consultoria, set. 2009.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras.** Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

THYSSENKRUPP, T. I. S. **Fornos para calcinação_setor de cal**, 17 out. 2014.

TWA; CLM. **Merged and sorted comments master spread sheet on draft 1 and information**, 2007.

USGS - U. S. Geological Survey. **2012 Minerals Yearbook. Lime (advance release)**U.S. Departament of the Interior; U.S. Geological Survey, , jun. 2013. Disponível em: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lime/myb1-2012-lime.pdf>

USGS - U. S. Geological Survey. **Lime. Statistics and Information.**, 2014. Disponível em: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lime/index.html#mcs>. Acesso em: 14 ago. 2014

VERBOR. **Engenharia & Serviços Verbor Latinoamérica. Projetos Realizados. Forno Maerz.** Disponível em: <http://www.verbor.com.br/projetos-realizados.php>. Acesso em: 17 jul. 2014.

VOTORANTIM, C. **Divisão Calcário Votorantim**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=2_zXqYXZaRQ>. Acesso em: 14 ago. 2014.

VOTORANTIM, C. **Processo de fabricação da cal**. Disponível em: <http://www.votorantimcimentos.com.br/htms-ptb/Produtos/Cal_procFabricacao.html>. Acesso em: 14 ago. 2014.

WEN, Y.; XIANG, L.; JIN, Y. Synthesis of plate-like calcium carbonate via carbonation route. **Materials Letters**, v. 57, n. 16–17, p. 2565–2571, maio 2003.

WPAC - Wood Pellet Association of Canada. **Pellets**. Disponível em: <http://www.pellet.org/>. Acesso em: 11 dez. 2014.

ZRCBV, M. B. V. **Mineração / Mineradora / Calcário Bela Vista / Cal Xerez**, 9 maio 2012. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=N_a6VAK3ikA&feature=youtube_gdata_player>. Acesso em: 17 ago. 2014