

MARCELA ALVARES MACIEL

SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL

**LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2008**

MARCELA ALVARES MACIEL

SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Pós Graduação *Lato Sensu* em Formas Alternativas de Energia, para obtenção do título de Especialização.

Orientador:

Prof. Carlos Alberto Alvarenga

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2008

MARCELA ALVARES MACIEL

SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Pós Graduação *Lato Sensu* em Formas Alternativas de Energia, para obtenção do título de Especialização.

APROVADA em ____ de agosto de 2008.

Prof.

Prof.

Prof.

UFLA

Prof. Carlos Alberto Alvarenga (Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2008

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iv
RESUMO	v
1 INTRODUÇÃO	01
2 INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL	06
2.1 Indicador 1: Difusão de Energias Renováveis (ER)	09
2.2 Indicador 2: Controle de emissões atmosféricas (CE)	13
2.3 Indicador 3: Capacidade de Autogeração de Energia (AG)	16
2.4 Indicador 4: Medidas de Racionalização de Consumo (RC)	17
3 METODOLOGIA	19
4 DIAGNÓSTICO DA SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL	23
4.1 Indústria de Alumínio	23
4.2 Indústria de Cimento	33
4.3 Indústria de Papel e Celulose	47
4.4 Indústria Petroquímica	56
4.5 Indústria Siderúrgica	67
5 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	79
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXO A Termo de Autoria	94
ANEXO B Termo de Revisão de Português	95

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - INDICADORES ISED ADAPTADOS AO BRASIL POR CIMA (2006)	06
FIGURA 2 - INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA DE COSTA (2002)	07
FIGURA 3 - INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL	08
FIGURA 4 - EVOLUÇÃO DA OFERTA INTERNA DE ENERGIA	10
FIGURA 5 - EVOLUÇÃO DA OFERTA DE ENERGIA INTERNA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS	10
FIGURA 6 - COMPARAÇÃO ENTRE AS OFERTAS INTERNA DE ENERGIA DO BRASIL, JAPÃO E CANADÁ	12
FIGURA 7 - RELAÇÃO ENTRE EMISSÕES DE CARBONO E CONSUMO DE ENERGIE PER CAPITA (1980-2000)	14
FIGURA 8 - EMISSÕES SETORIAIS DE DIÓXIDO DE ENXOFRE (KT) – 1980 – 2000	15
FIGURA 9 - EMISSÕES SETORIAIS DE NOX (KT) – 1980-2000	15
FIGURA 10 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO INDICE DE SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL	19
FIGURA 11 - NÍVEIS DE SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL	20
FIGURA 12 - VALORES ATRIBUÍDOS AO INDICADOR AUTOGERAÇÃO DE ENERGIA (A) E DIFUSÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS (B)	21
FIGURA 13 - VALORES ATRIBUÍDOS AO INDICADOR CONTROLE DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS (A) E RACIONALIZAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA (B)	21
FIGURA 14 – CONSUMO FINAL DE ENERGIA DO SETOR INDUSTRIAL (2006)	22
FIGURA 16 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO PRODUTIVO DE ALUMÍNIO	23
FIGURA 17 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO FINAL DE ENERGIA DO SEGMENTO NÃO FERROSOS RELATIVO AO TOTAL DO SETOR INDUSTRIAL	24
FIGURA 18 - EVOLUÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA DO SETOR NÃO FERROSOS	25
FIGURA 19 - MATRIZ ENERGÉTICA DO SETOR NÃO FERROSOS (2006)	25
FIGURA 20 - UNIDADES INDUSTRIAIS DA ALCOA NO BRASIL	26
FIGURA 21 - FLUXO DE PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO	27
FIGURA 22 - ABASTENCIMENTO DE ENERGIA ALCOA	28

FIGURA 23 – SEGURANÇA ENERGÉTICA NA ALCOA BRASIL _____	29
FIGURA 24 - USO DE MATERIAIS E ENERGIA ELÉTRICA NA ALCOA _____	29
FIGURA 25 – INVENTÁRIO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS NA ALCOA _____	31
FIGURA 26 - O CICLO DE VIDA DO ALUMÍNIO _____	32
FIGURA 27 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO PRODUTIVO DO CIMENTO _____	34
FIGURA 28 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO FINAL DO SEGMENTO DE CIMENTO RELATIVO AO TOTAL DO SETOR INDUSTRIAL _____	35
FIGURA 29 - COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DE CIMENTO _____	36
FIGURA 30 - EVOLUÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA DO SETOR DE CIMENTO _____	37
FIGURA 31 - MATRIZ ENERGÉTICA DO SETOR DE CIMENTO (2006) _____	37
FIGURA 32 - RELAÇÃO ENTRE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA , SUPERFÍCIE ESPECÍFICA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO CLÍNQUER _____	38
FIGURA 33 - EMISSÕES DE CO ₂ EM FUNÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS NOS PROCESSOS PRODUTIVOS _____	39
FIGURA 34 - MECANISMO DE FORMAÇÃO DO SO ₂ _____	40
FIGURA 35 - MECANISMO DE FORMAÇÃO DO NO _x _____	41
FIGURA 36 - EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO DA HOLCIM BRASIL _____	43
FIGURA 37 - EMISSÕES DE DIÓXIDO DE ENXOFRE DA HOLCIM BRASIL _____	44
FIGURA 38 - CONSUMO DIRETO DE ENERGIA TÉRMICA NA HOLCIM BRASIL _____	45
FIGURA 39 - MATRIZ E SEGURANÇA ENERGÉTICA DA HOLCIM BRASIL _____	46
FIGURA 40 - PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS PARA COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS _____	46
FIGURA 41 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO PRODUTIVO DA CELULOSE _____	48
FIGURA 42 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO FINAL DO SETOR DE PAPEL E CELULOSE RELATIVA AO TOTAL DO SEGMENTO INDUSTRIAL _____	49
FIGURA 43 - MATRIZ ENERGÉTICA DO SETOR DE PAPEL E CELULOSE (2006) _____	50
FIGURA 44 - EVOLUÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA DO SETOR DE PAPEL E CELULOSE _____	50
FIGURA 45 - UNIDADES INDUSTRIAIS DA ARACRUZ CELULOSE NO BRASIL _____	52
FIGURA 46 - MATRIZ ENERGÉTICA DA ARACRUZ CELULOSE EM 2006 _____	53
FIGURA 47 - SEGURANÇA ENERGÉTICA NA ARACRUZ CELULOSE EM 2006 _____	54
FIGURA 48 - EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) DA ARACRUZ CELULOSE _____	55
FIGURA 49 - PROCESSAMENTO INDUSTRIAL QUÍMICO _____	56
FIGURA 50 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO PRODUTIVO DA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA _____	57
FIGURA 51 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO FINAL DE ENERGIA DO SEGMENTO QUÍMICO RELATIVO AO TOTAL DO SETOR INDUSTRIAL _____	58

FIGURA 52 - EVOLUÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA DO SETOR QUÍMICO _____	59
FIGURA 53 - MATRIZ ENERGÉTICA DO SETOR QUÍMICO (2006) _____	59
FIGURA 54 - PIRÂMIDE DE RECICLABILIDADE DE PRODUTOS PETROQUÍMICOS _____	60
FIGURA 55 - CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA SUZANO PETROQUÍMICA _____	62
FIGURA 56 - CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA NA SUZANO PETROQUÍMICA _____	64
FIGURA 57 - EMISSÃO DE NO _x E N ₂ O NA SUZANO PETROQUÍMICA _____	65
FIGURA 58 - EMISSÃO DE CO ₂ NA SUZANO PETROQUÍMICA _____	66
FIGURA 59 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO PRODUTIVO DO AÇO _____	68
FIGURA 60 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO FINAL DO SETOR DE FERRO LIGAS E AÇO RELATIVA AO TOTAL DO SEGMENTO INDUSTRIAL _____	69
FIGURA 61 - MATRIZ ENERGÉTICA DO SETOR FERRO GUSA E AÇO (2006) _____	70
FIGURA 62 - EVOLUÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA FERRO GUSA E AÇO _____	70
FIGURA 63 - MATRIZ ENERGÉTICA DA ARCELOR MITTAL TUBARÃO EM 2006 _____	73
FIGURA 64 - EMISSÕES DE SO ₂ NA ARCELOR MITTAL (CONTROLADA BELGO) _____	74
FIGURA 65 - EMISSÕES DE NO _x NA ARCELOR MITTAL (CONTROLADA BELGO) _____	75
FIGURA 66 - CONTROLE DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) NA ARCELOR MITTAL TUBARÃO _____	77
FIGURA 67 - MODELO DE SEGURANÇA ENERGÉTICA DA ARCELOR MITTAL TUBARÃO _____	78
FIGURA 68 - SEGURANÇA ENERGÉTICA NA ARCELOR MITTAL TUBARÃO EM 2006 _____	78
FIGURA 69 - SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL DA ALCOA _____	85
FIGURA 70 - SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL DA HOLCIM _____	86
FIGURA 71 - SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL DA ARACRUZ CELULOSE _____	87
FIGURA 72 – SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL DA SUZANO PETROQUÍMICA _____	88
FIGURA 73 – SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL DA ARCELOR MITTAL _____	88
FIGURA 74 – AVALIAÇÃO DO FLUXO DE MATERIAIS E ENERGIA NO SOFTWARE UMBERTO _____	89

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (MT CO ₂ EQ) – 1980 – 2000 _____	13
TABELA 2 - AUTOGERAÇÃO NA ALCOA- USINAS HIDRELÉTRICAS _____	28
TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DA INDÚSTRIA DE CIMENTO BRASILEIRA _	35
TABELA 4 - FORMAÇÃO E REMOÇÃO DE SO ₂ NOS FORNOS DE CLÍNQUER. _____	40
TABELA 5: TECNOLOGIAS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO _____	71
TABELA 6 - UNIDADES INDUSTRIAIS DA ARCELOR MITTAL NO BRASIL _____	72
TABELA 7- AVALIAÇÃO DO INDICADOR DIFUSÃO ENERGIAS RENOVÁVEIS _____	81
TABELA 8 - AVALIAÇÃO DO INDICADOR AUTOGERAÇÃO DE ENERGIA _____	82
TABELA 9 - AVALIAÇÃO DO INDICADOR CONTROLE DE EMISSÕES _____	83
TABELA 10 - AVALIAÇÃO DO INDICADOR RACIONALIZAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ____	84

RESUMO

O setor industrial é um dos grandes consumidores de energia, sendo que os segmentos de alumínio, cimento, papel e celulose, petroquímica e siderurgia merecem acompanhamento e tratamento específico, já que respondem por quase metade de toda a demanda industrial por energia elétrica. Na última década, a incorporação das preocupações energéticas ao discurso ambiental em resposta às metas estabelecidas no Protocolo de Quioto justifica o estudo da sustentabilidade energética industrial. Para tanto, utiliza-se de indicadores derivados de bases existentes, em conformidade com as estratégias nacionais do Comitê Interministerial de Mudanças Climáticas. Assim, constituem ações em direção a sustentabilidade energética industrial: reduzir a utilização de combustíveis fósseis, diminuir a emissão de substâncias poluentes, adotar políticas de conservação de energia e de recursos, substituir recursos não renováveis por renováveis e aumentar a eficiência em relação aos recursos utilizados, incluindo-se autogeração de energia. O diagnóstico da sustentabilidade energética industrial é realizado através de estudos de caso de empresas de grande representatividade nos setores industriais estudados: Alcoa, Holcim, Aracruz Celulose, Suzano Petroquímica e Arcelor Mittal. Apesar da existência de diversas iniciativas dessas empresas em direção a sistemas de energia sustentáveis, os resultados sugerem que a sustentabilidade energética industrial ainda é um grande desafio, principalmente em termos de energias renováveis e eficiência energética.

Palavras Chave: Sustentabilidade – Energia – Indústria – Indicadores

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho, intitulado *Sustentabilidade Energética Industrial*, constitui-se de uma análise crítica dos modelos de desenvolvimento de sistemas de energia sustentáveis adotados por empresas do setor industrial brasileiro. Para tanto, parte-se da definição de desenvolvimento sustentável¹ e seus desdobramentos até a inclusão da questão energética nesse conceito.

Entende-se por desenvolvimento sustentável aquele capaz de atender às necessidades presentes do homem contemporâneo sem comprometer o direito das futuras gerações fazerem o mesmo. O consumo de recursos naturais de acordo com sua capacidade de renovação consiste no princípio básico deste conceito, sendo que as questões ambientais e escassez de recursos energéticos fazem parte desse discurso.

A Conferência de Estocolmo, realizada em 1972, apresenta-se como o marco da construção do conceito de *desenvolvimento sustentável*. Dentre os temas de discussão nesta conferência, destacam-se a poluição e a preservação ambiental, sendo os limites do crescimento o paradigma dominante. Machado (2006) aponta que o crescimento da população, a crescente escassez de recursos e o acúmulo de poluição, combinados entre si, limitariam a expansão da economia mundial. Haveria, em suma, limites ao crescimento.

Os países em desenvolvimento apresentaram restrições no tratamento das questões ambientais, tendo em vista o paradigma dominante da oposição a estratégias de desenvolvimento com o uso intensivo de recursos. Enfatiza-se assim o receio desses países de que as questões ambientais se tornem um obstáculo ao desenvolvimento.

A proposta de discussão dos paradigmas de desenvolvimento e sua repercussão na utilização dos recursos naturais e sistemas ecológicos, em detrimento ao tratamento das questões ambientais em seu sentido estrito senso, apresentada pelos países em desenvolvimento, culminou na definição de *desenvolvimento sustentável*: modelo de desenvolvimento que satisfaz as necessidades das gerações presentes sem afetar a capacidade de gerações futuras de também satisfazer suas próprias necessidades. (WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT, 1987 *apud* MACHADO, 2006).

Portanto, o conceito de desenvolvimento sustentável surgiu pela constatação de que o desenvolvimento econômico também tem que levar em consideração o equilíbrio ecológico e a preservação da qualidade de vida das populações humanas em nível global. Permite-se, assim, o restabelecimento do diálogo entre ONGs, comunidades científicas, empresários, governos de países

¹ Neste trabalho, adotou-se a definição de desenvolvimento sustentável apresentado no Relatório de Brundtland elaborado pela World Commission on Environment and Development (WCED) apresentada em 1987.

desenvolvidos e de países em desenvolvimento. As preocupações energéticas só foram incorporadas ao discurso ambiental na última década em resposta às metas estabelecidas no Protocolo de Quioto. Geller (2003) assegura que o desenvolvimento da energia sustentável não deveria por em risco a qualidade de vida das gerações atuais nem a das futuras gerações, além de não ameaçar ecossistemas críticos.

O Protocolo de Quioto, discutido e negociado no Japão em 1997, consiste num acordo internacional de importância sem precedentes em matéria de cooperação internacional e de defesa ambiental. Para os países que o ratificarem, esse acordo quantifica metas de redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE) para fins de prevenção das conseqüências que o aumento da temperatura da Terra pode trazer. É importante destacar a adoção de mecanismos de flexibilização, oferecendo aos países industrializados a possibilidade de alcançarem parte da redução de GEE fora dos limites das suas fronteiras. Pretende-se, então, minimizar os custos que as economias dos governos teriam que enfrentar ao ratificar esse o Protocolo.

Nesse contexto surgem as primeiras iniciativas no âmbito da economia e uso racional de energia elétrica, sendo atualmente a gestão dos recursos de energia um dos principais desafios da sociedade mundial. A superação desse desafio envolve a mudança de paradigma energético incluindo a garantia do progresso social, do equilíbrio ambiental e do sucesso econômico. Geller (2003) garante que o desenvolvimento da energia sustentável deveria ser capaz de fornecer serviços adequados de energia para satisfazer as necessidades humanas básicas, melhorando o bem estar social, além de atingir um desenvolvimento econômico em todo o mundo.

O cumprimento insuficiente dos compromissos assumidos pela comunidade internacional, internacional na Conferência do Rio de Janeiro (Eco-92), especialmente em relação às recomendações da Agenda 21, incluindo-se adoção de fontes alternativas de energia e melhorias na eficiência energética, foi analisado na Conferência de Joanesburgo em 2002. Temos, dessa maneira, a determinação do princípio das responsabilidades comuns, mas diferenciadas, como parâmetro na avaliação do desenvolvimento sustentável dos países industrializados.

De acordo com Machado (2006), sob esse princípio os Estados são igualmente responsáveis pela preservação do meio ambiente, porém de forma diferenciada em razão de seu processo histórico de desenvolvimento e do estoque de recursos financeiros, humanos, tecnológicos e institucionais que dispõem.

A intensificação da eficiência energética e da co-geração, o aumento da participação das fontes alternativas na matriz energética, com ênfase nas energias renováveis, bem como a fixação de dióxido de carbono apresentam-se como estratégias complementares na busca do desenvolvimento sustentável em nível energético.

De acordo com Geller (2003), as principais tendências econômicas e sociais do mundo atual, como a crescente globalização, a reestruturação do setor energético e sua privatização, a rápida inovação tecnológica e urbanização irão influenciar as estratégias e sistemas energéticos do século XXI.

Uma ampla gama de barreiras limita a introdução e implementação da eficiência energética e de tecnologias de energias renováveis no mundo inteiro, envolvendo um grande número de questões e considerações. Geller (2003) apresenta àquelas de natureza técnica, tais como a oferta limitada de produtos associada a problemas de qualidade, bem como as de natureza comportamental, mais especificamente a baixa prioridade dada a questões energéticas ou a tendência de aquisição de produtos com base no menor custo inicial.

Deficiências nos meios de operação do mercado e políticas e instituições públicas também são apresentadas por Geller (2003) como barreiras ao desenvolvimento da energia sustentável. A primeira refere-se a consumidores mal informados, subsídios aos preços de energia, bem como falta de inclusão de custos sociais e ambientais nos preços da energia. A última refere-se à falta de financiamento atraente e deficiências nas regulamentações, seja para medidas de eficiência ou para energias renováveis. Acrescenta-se a isso ainda a penalização das políticas fiscais para esse tipo de tecnologia. Esse autor chama atenção que o objetivo final é tornar prática normal a eficiência energética, a tecnologia ou práticas de energias renováveis, por meio de um conjunto de intervenções coordenadas no mercado.

Portanto, Geller (2003) destaca a necessidade de adoção de um conjunto de políticas complementares para superação das barreiras que inibem o desenvolvimento de energias renováveis por meio de políticas bem planejadas e bem implementadas. Para tanto, sugere a estratégia de transformação de mercado para remover as barreiras, de maneira a conseguir uma mudança permanente no mercado.

A abordagem da transformação de mercado inclui a necessidade de integração de políticas para superar múltiplas barreiras, ou seja, as políticas apresentam melhores resultados quando implantadas conjuntamente dentro de um sistema de inovação amplo e complexo. É importante ressaltar ainda a consistência dessa abordagem com o conceito de curvas de aprendizado e de experiência de mercado, ou seja, o custo de produção de uma tecnologia diminui à medida que aumenta a experiência do produtor.

Dessa forma, Geller (2003) apresenta políticas adequadas a cada etapa deste processo de transformação de mercado. Para mercados iniciais de tecnologias de energia renovável sugere incentivo financeiro, pesquisa e desenvolvimento. Já para acelerar a adoção e estabelecimento no mercado, é abordada a necessidade de financiamentos, de acordos voluntários e da disseminação da

informação. Para maximização da participação de mercado e/ou competição no seu processo de transformação, destaca-se frequentemente políticas de regulamentação e obrigações de mercado.

Estudos de casos realizados por Geller (2003) acerca de medidas de eficiência energética e investimento em energias renováveis em vários países sugerem como denominador comum à importância do comprometimento e apoio por parte do governo, bem como participação e implementação ativas por parte do setor privado. Em alguns casos, observa-se a importância de esforços sustentáveis por períodos superiores a 10 anos.

No caso brasileiro, Geller (2003) considera a eletricidade como condicionante para impulsionar o desenvolvimento industrial, sendo o potencial de conservação de energia inquestionável. Seus estudos apontam que, apesar do sucesso no programa de eficiência energética brasileiro, ainda é significativo o desperdício de energia devido a processos e equipamentos ineficientes. O autor apresenta, com base em auditorias na área industrial, um potencial de 8 a 15 % de redução no consumo deste setor. O mesmo autor afirma ainda a eficiência energética constituir-se como uma valiosa oportunidade para as empresas se afirmarem como parte da solução, com criação de valor real para o negócio e simultaneamente para a sociedade e para o ambiente.

A implementação de medidas de eficiência energética na indústria pode trazer, além do aumento do rendimento energético de equipamentos e instalações com a conseqüente melhoria da qualidade dos produtos fabricados, significativa redução de custos. Para a sociedade, destaca-se a redução dos investimentos para a construção de usinas e redes elétricas e conseqüente redução dos custos da eletricidade. Acrescenta-se a isso, redução dos preços de produtos e serviços e ainda maior garantia de fornecimento de energia elétrica e de atendimento a novos consumidores no futuro.

Ao considerar este contexto de crescente necessidade de insumos para a operacionalização de atividades produtivas utilizando-se de mecanismos inovadores de gestão de recursos, é válido mencionar o grande potencial brasileiro para o desenvolvimento de energias renováveis, em conformidade com o Balanço Energético Nacional (BEN).

Segundo May, (2003) *apud Santos et al* (2006), a incompatibilidade entre a dinâmica biológica, que determina sua evolução, e a econômica, que determina o ritmo da exploração do recurso, contribui para o entendimento da pouca utilização dos recursos renováveis na matriz energética. Para superar essa dicotomia, torna-se fundamental a exploração dos recursos renováveis tendo como compromisso ético e responsável a prática do desenvolvimento industrial focado na sustentabilidade. Santos *et al* (2006) assegura que o uso de energias renováveis pelas indústrias é uma ação estratégica, que exige planejamento, responsabilidade ambiental, compromisso com a sociedade, além de amplo envolvimento e conhecimento quanto aos recursos provenientes da natureza.

De acordo com Silva (2005), as maiores dificuldades na gestão energética estão nas empresas de menor nível de capacidade tecnológica, em função das dificuldades de interferência nas micro-tecnologias dos produtos e processos, seja nas tecnologias principais, seja nas complementares. Assim, este autor sugere a existência de correlação entre a capacidade tecnológica da empresa e procedimentos de gestão ambiental e energética, o que indica o grau de incorporação destes conhecimentos dentro da matriz de relacionamentos das atividades rotineiras da empresa. Locke (1999) *apud* Silva (2005) afirma que a vantagem competitiva das organizações começa com a constante descoberta de novos conhecimentos, seguida pela constante comunicação e utilização desses conhecimentos.

Diante deste contexto, destaca-se a necessidade de investimentos em infra-estrutura e em projetos científicos capazes de promover a geração de conhecimento e inovação tecnológica no âmbito da sustentabilidade energética industrial. O presente trabalho insere-se nessa perspectiva de compreensão da sustentabilidade energética no setor industrial brasileiro. Isso se dará a partir de estudos de casos de empresas de grande representatividade nos segmentos industriais que respondem por quase metade de toda a demanda industrial por energia elétrica, sendo eles: alumínio, cimento, papel e celulose, petroquímica e siderurgia.

Para tanto, este trabalho está estruturado em 6 capítulos, sendo o primeiro esta introdução. No segundo capítulo, a partir de uma revisão bibliográfica de bases de indicadores energéticos, são derivados indicadores de sustentabilidade energética industrial. A metodologia de avaliação do perfil das empresas que são objetos de estudo do caso é apresentada no capítulo três, seguido do diagnóstico da sustentabilidade energética industrial propriamente dita, no capítulo 4. Nesse, são apresentados os perfis dos segmentos industriais em que as empresas que são objetos de estudo inserem-se, com ênfase em insumos e produtos energéticos dos processos industriais. Uma análise comparativa dos resultados dos indicadores de sustentabilidade energética é apresentada no capítulo cinco. Considerações finais são delineadas no capítulo seis, seguido das referências bibliográficas adotadas na realização desse estudo.

2 INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA

Os indicadores, por definição, representam valores estatísticos que revelam, no tempo, o estado específico e determinado de um fenômeno observável e mensurável. De maneira geral, os indicadores de sustentabilidade energéticos fornecem informações que servem de base para a formulação de políticas e medidas de gestão para planejamento. (MACHADO, 2000 *apud* CIMA, 2006)

Em 1999, um programa internacional iniciado pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) em parceria com diversas organizações internacionais, desenvolveu um conjunto de 41 indicadores denominados ISED (*Indicators for Sustainable Energy Development*). O objetivo fundamental desses indicadores era o estabelecimento de uma ferramenta analítica que possibilitasse a avaliação, o monitoramento e a comparação do nível de sustentabilidade energética dos países. (CIMA, 2006)

Cima (2006) apresenta uma adaptação dos indicadores ISED à realidade do sistema energético brasileiro, de modo a permitir o detalhamento das especificidades existentes no Brasil. Destaca-se, nesse sentido, a elevada participação de fontes renováveis na oferta interna de energia (lenha, cana de açúcar, carvão vegetal, álcool etílico), assim como o potencial de geração de energia hidrelétrica e eólica existente em território nacional. (FIGURA 1)

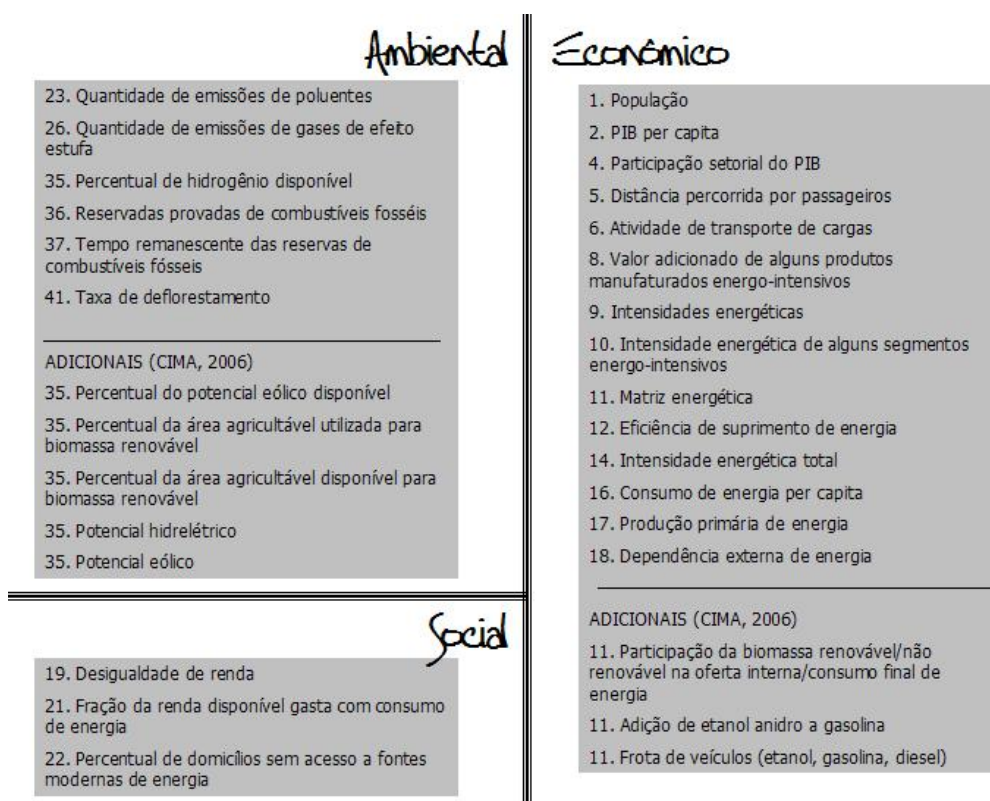


FIGURA 1 - INDICADORES ISED ADAPTADOS AO BRASIL POR CIMA (2006)

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados de CIMA (2006).

Cencig (2002), numa iniciativa do Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (NIPE) da UNICAMP, discute aspectos de diversos enfoques de modelos de indicadores energético-ambientais, tais como análise do ciclo de vida e sustentabilidade. Em relação ao último, apresenta uma base de oito indicadores, originalmente publicada por Costa (2002), para análise do setor energético. Esses indicadores, que são números adimensionais apresentados em gráficos de tipo radar, são agrupados em quatro categorias, sendo a primeira referente a aspectos ambientais: um indicador relativo ao meio ambiente global e outro relativo ao meio ambiente local. A segunda categoria compreende dois indicadores econômicos e a terceira categoria compreende dois indicadores sociais. Finalmente, a quarta categoria engloba aspectos tecnológicos do setor energético. (FIGURA 2)

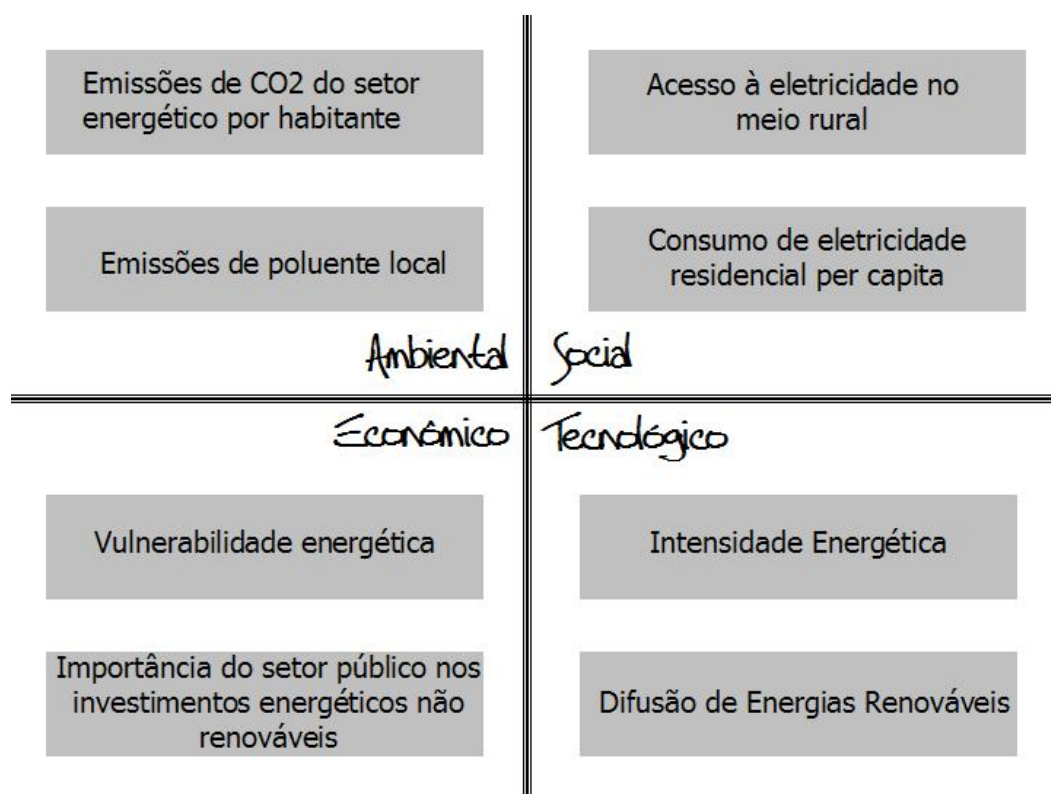


FIGURA 2 - INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA DE COSTA (2002)
 Fonte: Elaboração própria, a partir de dados de COSTA (2002)

Os setores e as atividades definidas pelo Comitê Interministerial de Mudanças Climáticas como interesse prioritário para o âmbito nacional são apresentadas por Scarpinella (2002): ampliação do uso de fontes de energia, como as renováveis; conservação de energia e aumento da eficiência energética; substituição do uso de recursos energéticos de origem fóssil por fontes energéticas renováveis ou de baixo potencial emissor; melhoria e redução de emissões de sistemas de transporte; co-geração de eletricidade; aumento da oferta energética nacional através do uso de fontes renováveis, não emissoras ou de baixo potencial de emissão; reflorestamento e recuperação de áreas desflorestadas e/ou degradadas compatíveis com as definições nacionais e regionais de uso do solo e áreas de proteção.

Conforme apresentado, têm sido desenvolvidos diversos indicadores energéticos, sendo sua construção e aplicação diretamente associadas ao objetivo do estudo ou à análise a ser realizada (CIMA, 2006). Assim, para fins de avaliação da sustentabilidade energética industrial, foram selecionados neste trabalho quatro indicadores das bases existentes em conformidade com as estratégias nacionais do Comitê Interministerial de Mudanças Climáticas. Tais indicadores são agrupados em quatro temáticas, abrangendo aspectos econômicos, sociais e ambientais de maneira implícita. (FIGURA 3)

A primeira temática refere-se à diversificação da matriz energética das indústrias, sendo o indicador correspondente à difusão das energias renováveis. A partir da avaliação da redução de emissões de gases de efeito estufa, e de outros poluentes, pretende-se abordar a temática de controle de impacto ambiental das transformações energéticas industriais.

A vulnerabilidade dos processos industriais ao fornecimento de energia justifica a temática de segurança energética, cujo indicador avaliado é a capacidade de autogeração de energia, incluindo a co-geração da mesma. Finalizando as temáticas agrupadas, são avaliadas as iniciativas relativas à conservação de energia e à eficiência energética nos processos industriais.

Índice de Sustentabilidade Energética Industrial (SEI)

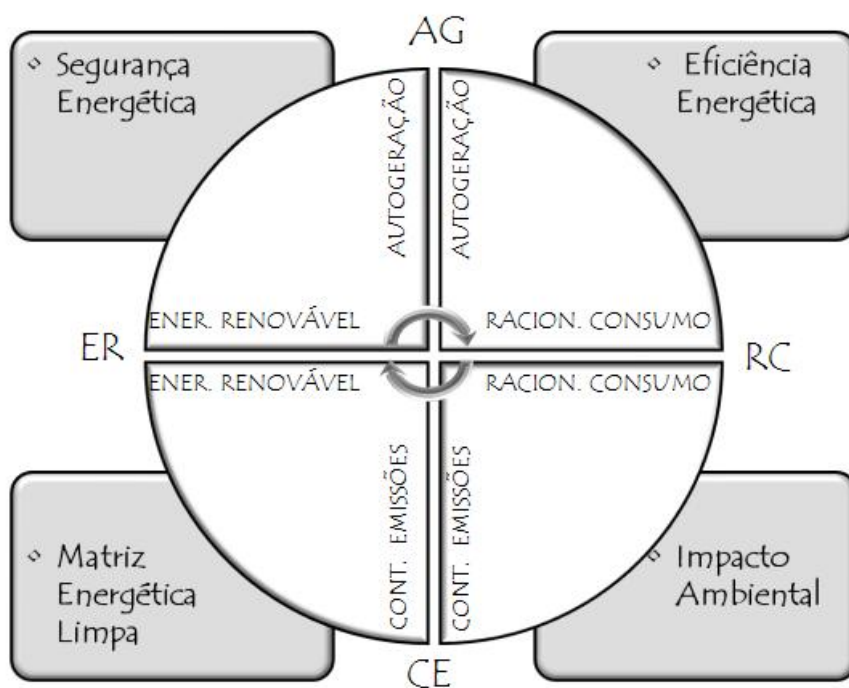


FIGURA 3 – INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL.

Fonte: Elaboração própria.

2.1 Indicador 1: Difusão de Energias Renováveis (ER)

A tendência atual de mudança do foco da geração centralizada de energia para a geração distribuída, indiferente da configuração, tende para os mesmos resultados, sendo eles: fornecimento de energia de fontes mais diversificadas, desenvolvimento de sistemas de energia sustentáveis, solução de problemas e barreiras de interconexão dos sistemas e maior competitividade para os consumidores. (Clark & Isherwood, 2004 *apud* Silva, 2005)

Não há dúvidas do potencial favorável da disseminação de energias renováveis no Brasil. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2004) considera que as disponibilidades locais de recursos renováveis para o atendimento da demanda de forma equilibrada e sustentável são suficientemente abundantes para garantir a auto-suficiência energética do Brasil. Bermann (2005), *apud* Santos *et all* (2006), ressalta que as possibilidades de maior disseminação das energias renováveis devem necessariamente vir acompanhadas de uma mudança de concepção dos sistemas energéticos existentes, dando lugar à geração distribuída.

Historicamente, a participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira é muito expressiva e ainda hoje apresenta características únicas para um país de seu porte econômico e renda média. Entretanto, parece inevitável que em médio prazo haja no Brasil uma maior dependência dos combustíveis fósseis, em especial do gás natural (CAPRIGLIONE, 2006). É o que se pode confirmar pela declaração de Velazquez (2000) de que o impulso na direção de se ampliar o leque de ofertas na matriz energética está levando muitos países a promover o uso mais acentuado do gás natural, principalmente para a geração térmica.

O Brasil possui muitos recursos hídricos, localizados principalmente na região sul e sudeste, que permitem a geração de energia hidroelétrica. Até a década de 70, a participação dessa fonte energética foi inexpressiva, sendo essa situação alterada pela operação das grandes indústrias hidroelétricas brasileiras, que provocou um aumento consistente nessa produção energética só interrompido pelo racionamento de energia em 2001. Destaca-se, assim, essa fonte renovável como a mais importante em termos da geração de energia elétrica no Brasil, uma das três maiores gerações hidráulicas no mundo. (CAPRIGLIONE, 2006)

O Brasil apresenta ainda um elevado potencial para utilização da biomassa, seja por meio do tradicional uso do álcool como combustível, seja pela moderna utilização do etanol e do bagaço de cana-de-açúcar (CAPRIGLIONE, 2006). O Programa Pró-Álcool possibilitou o incremento da participação dessa fonte de energia na matriz energética nacional a partir de 1975, representando cerca de 20% a partir de 2001. A lenha e o carvão vegetal foram os principais combustíveis utilizados no Brasil até meados da década de 50. Segundo Capriglione (2006), a substituição da lenha e do carvão vegetal por petróleo e seus derivados, em função de uma modernização da utilização das fontes renováveis, justifica o decréscimo de participação das energias renováveis na matriz energética brasileira. Entretanto, essa participação ainda se mantém superior a 40%, situação ímpar em todo o mundo.

Evolução da Oferta de Energia Interna

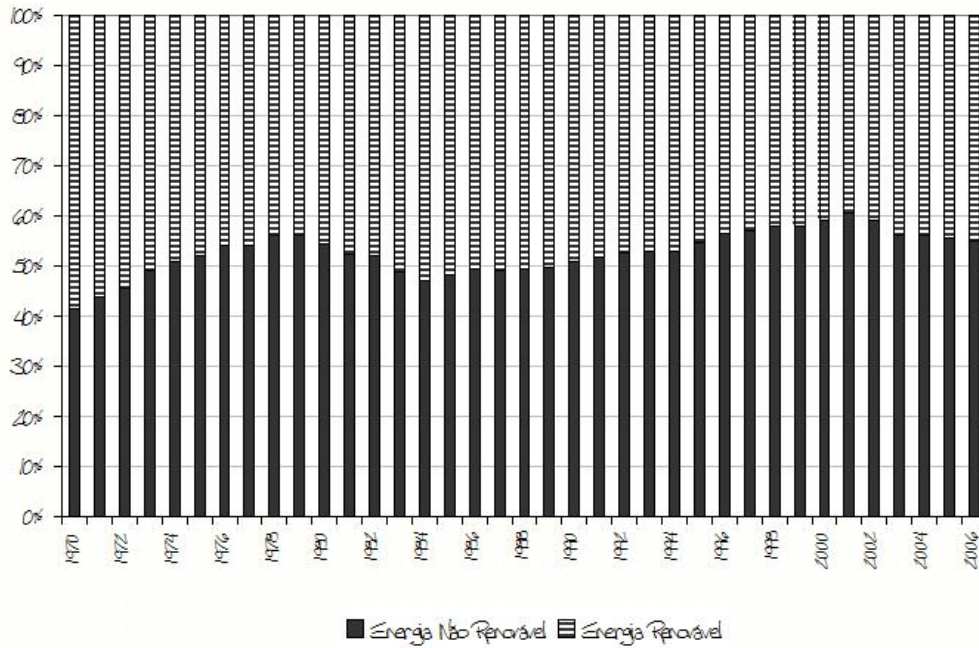


FIGURA 3 - EVOLUÇÃO DA OFERTA INTERNA DE ENERGIA

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do BEN 2007 (MME, 2007)

Evolução da Oferta de Energia Interna de Energias Renováveis

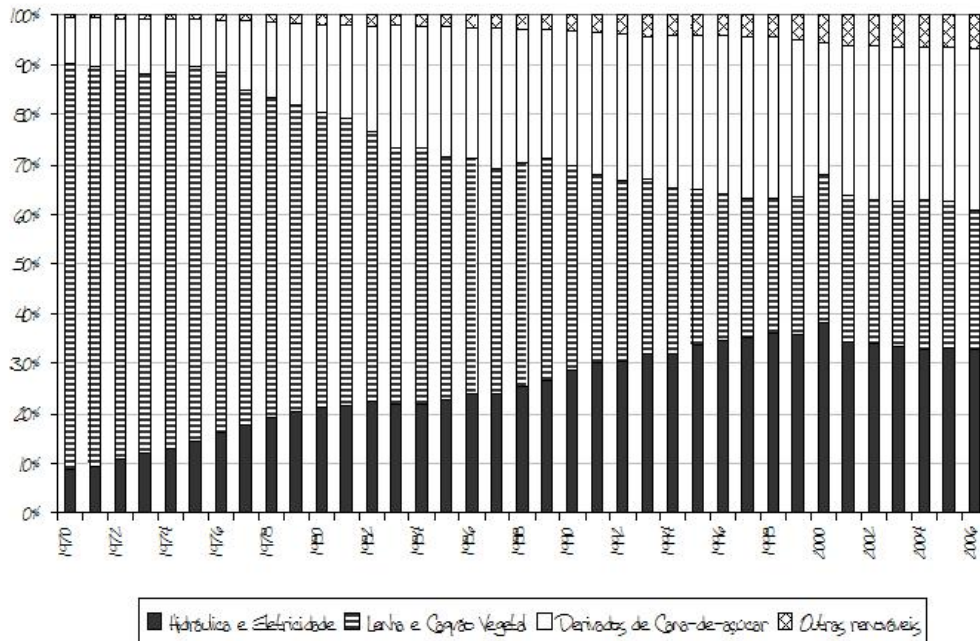


FIGURA 4 - EVOLUÇÃO DA OFERTA DE ENERGIA INTERNA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do BEN 2007 (MME, 2007)

Apesar da elevada participação das energias renováveis na matriz energética brasileira, é importante destacar que a obtenção do combustível não era sustentável, tendo em vista os desmatamentos predatórios. Segundo Weil (2005) *apud* Capriglione (2006) uma fonte renovável é aquela que pode ser reabastecida por processos naturais e ser utilizada repetidamente, podendo algumas fontes renováveis ser exauridas se não forem gerenciadas de maneira sustentável.

Em 2002 o Ministério de Minas e Energia (MME) institui o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA – para fins de diversificação da matriz energética nacional e, conseqüentemente, obter aumento de segurança no abastecimento de energia elétrica. Acrescenta-se a isso ainda, a valorização das características e potencialidades regionais e locais, com criação de emprego, capacitação e formação de mão de obra, além das perspectivas de redução das emissões de gases de efeito estufa.

Silva (2006) destaca a energia eólica dentre as fontes renováveis que ainda apresentam participação pouco expressiva para geração de energia elétrica, mas que essa fonte de energia apresenta perspectivas favoráveis à penetração na matriz energética nacional. Isso pode ser explicado pela confirmação da existência de um grande manancial eólico de alta qualidade técnica distribuído pelo território nacional, adicionado à emergente necessidade de expansão do sistema de abastecimento elétrico. Destaca-se, nesse sentido, o PROINFA, que estabelece a contratação de 1.100 MW de energia produzida por fontes eólicas no Sistema Interligado Nacional (SIN).

As oportunidades de captação de um considerável volume de projetos eólicos dentro do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL - vêm servindo de eixo condutor da atração de investidores determinados a aproveitar o potencial eólico nacional. O MDL é um dos mecanismos de flexibilização propostos no Protocolo de Quioto para auxiliar o processo de redução de emissões de gases do efeito estufa (GEE) ou de captura de carbono. Para tanto, os projetos podem contemplar fontes renováveis e alternativas de energia, eficiência e conservação de energia ou reflorestamento.

De acordo com a ANEEL (2004), no caso do aproveitamento da energia solar, uma das restrições técnicas à difusão de projetos é a baixa eficiência e o custo elevado dos sistemas de conversão de energia. Temos, assim, a necessidade do uso de grandes áreas para a captação de energia em quantidade suficiente para que o empreendimento se torne economicamente viável. Contudo, considerando-se as relações entre o índice médio de radiação solar do Brasil (1800 kWh/m² por ano), o consumo de energia elétrica do ano de 1998 (300 TWh) e a eficiência de conversão atual dos sistemas solares (12%), estima-se a necessidade de uma área de coletores solares correspondente a 5% da área alagada por usinas hidrelétricas no Brasil.

No caso do setor industrial, é interessante ressaltar que a difusão de energia oriunda de fontes renováveis pode favorecer o setor de forma crucial, seja pelo aumento em escalas de produção, seja pela diminuição de custos ou ainda, de uma maneira indireta, em avanços no mercado competitivo. (SANTOS *et all*, 2006)

De maneira distinta do Brasil, a participação das fontes renováveis na matriz energética da grande maioria dos países é muito pequena: cerca de 10%. No Japão, por exemplo, a evolução da matriz energética é marcada pelo desequilíbrio entre a geração de energia a partir de fontes renováveis e não renováveis. Segundo Capriglione (2006), a participação das fontes renováveis na matriz energética japonesa era praticamente nula na década de 60, tendo evoluído para cerca de 5% em 2001. (FIGURA 6)

A dicotomia entre o alto consumo de energia e a pouca disponibilidade de recursos naturais faz com que a dependência de importações para suprimento de energia no Japão seja da ordem de 80%. A priorização da energia nuclear no Japão foi motivada na década de 70 pela crise do petróleo, que correspondia a 50% da matriz energética japonesa.

O Canadá apresenta-se como exemplo de um país consumidor intensivo de energia, mas que desenvolveu uma política de energia renovável similar à brasileira, motivado pelo potencial hídrico. Entretanto, a evolução da participação das fontes renováveis canadenses e japonesas na oferta interna de energia ainda se apresenta bastante restrita, se comparada ao caso brasileiro: cerca de 10%. (FIGURA 6)

Matriz Energética – Oferta Interna de Energia

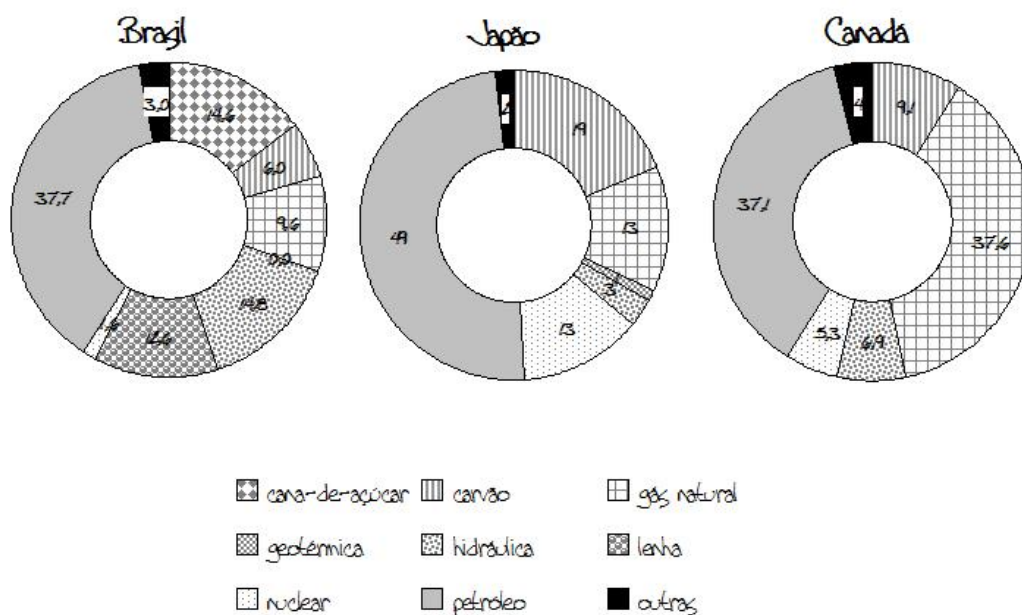


FIGURA 5 - COMPARAÇÃO ENTRE AS OFERTAS INTERNA DE ENERGIA DO BRASIL, JAPÃO E CANADÁ. Fonte: Adaptado de Capriglione (2006) e MME (2007)

2.2 Indicador 2: Controle de emissões atmosféricas (CE)

Entende-se por *impacto ambiental*¹ qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que direta ou indiretamente afetem: a saúde, a segurança e o bem-estar da população, as atividades sociais e econômicas, a fauna e a flora, as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente, bem como a qualidade dos recursos ambientais.

A discussão acerca da sustentabilidade energética industrial não se limita a exaustão dos recursos naturais. De acordo com Cima (2006), a extração, transformação e consumo de recursos energéticos estão intimamente relacionados com impactos no meio-ambiente, com destaque para o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, bem como de outros poluentes.

Nos inventários de emissões de gases de efeito estufa, observa-se que a maior parte das emissões está relacionada com o gás carbônico (CO₂), em detrimento à soma das emissões de ozônio, metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e vapor d'água (H₂O).

TABELA 1 - EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (MT CO₂ EQ) – 1980 – 2000

Ano	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total GAG
1980	263,6	2	0,4	266
1985	269,5	2,5	0,3	272,3
1990	273,9	2,6	0,3	276,9
1995	288,4	2,8	0,5	291,7
2000	334,5	2,5	0,6	337,6
2004	360,1	3,2	0,5	363,8

Fonte: Cima, 2006

Cima (2006) apresenta para o sistema energético brasileiro a relação entre emissões de gases de efeito estufa e oferta primária de energia (FIGURA 7). De uma maneira geral, observa-se a alternância entre os períodos de redução e o aumento das emissões coincidentes com os períodos de crise e recuperação econômica de setores industriais de uso energético-intensivos de combustíveis fósseis, respectivamente. Destaca-se, nesse sentido, o segmento de produção de bens industriais semi-acabados voltados para a exportação, tal como siderurgia, alumínio, papel e celulose.

¹ Definição de *impacto ambiental* de acordo com a Resolução CONAMA 01 de 1986.

Relação Emissões de Carbono e Consumo Energia per Capita 1980-2000

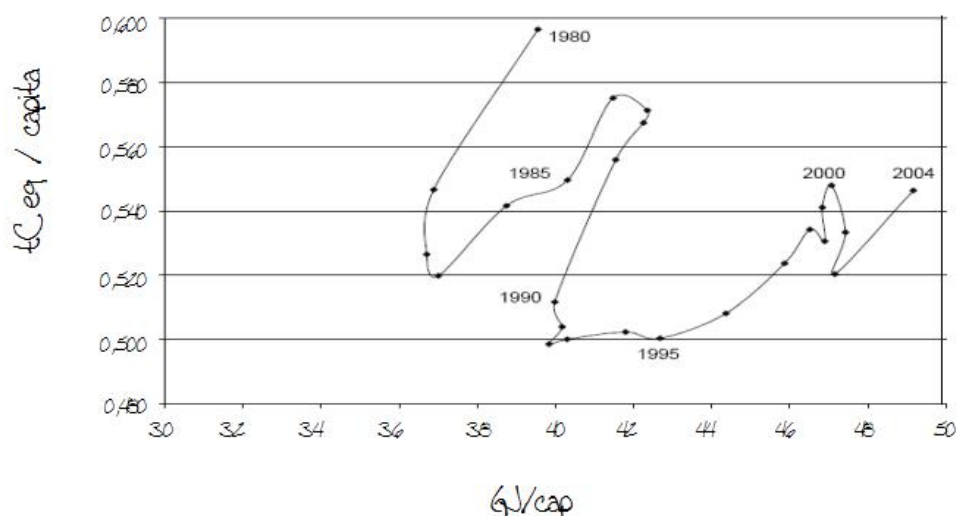


FIGURA 7 - RELAÇÃO ENTRE EMISSÕES DE CARBONO E CONSUMO DE ENERGIE PER CAPITA (1980-2000)

Fonte: CIMA (2006)

O contexto atual marcado pela substituição do carvão vegetal pelo coqueificável no setor siderúrgico, associado ao contexto de aumento da participação de termelétricas a base de gás natural na expansão do sistema elétrico brasileiro, justifica as estimativas de crescimento das emissões totais de gases de efeito estufa, superior a 1% ao ano. (CIMA, 2006)

Assim como no caso da emissão de gases de efeito estufa, o setor industrial também concentra grande parte das emissões de dióxido de enxofre (SO_2) do país. (FIGURA 8) Essas são resultantes da queima de óleo combustível residual com alto teor de enxofre para a geração de calor, assim como da utilização de carvão mineral no processo siderúrgico. A lixívia aproveitada para geração de energia elétrica nas indústrias de papel e celulose também apresenta um elevado grau de enxofre: cerca de 3%. (BALESTIERI, 1994 *apud* CIMA, 2006).

Da mesma forma que ocorre com o dióxido de enxofre, as emissões de NO_x também se concentram no setor industrial em especial. Essas emissões provêm principalmente da queima de combustíveis fósseis em caldeiras a altas temperaturas.(FIGURA 9).

Emissões Setoriais de SO₂ (kt) – 1980-2000

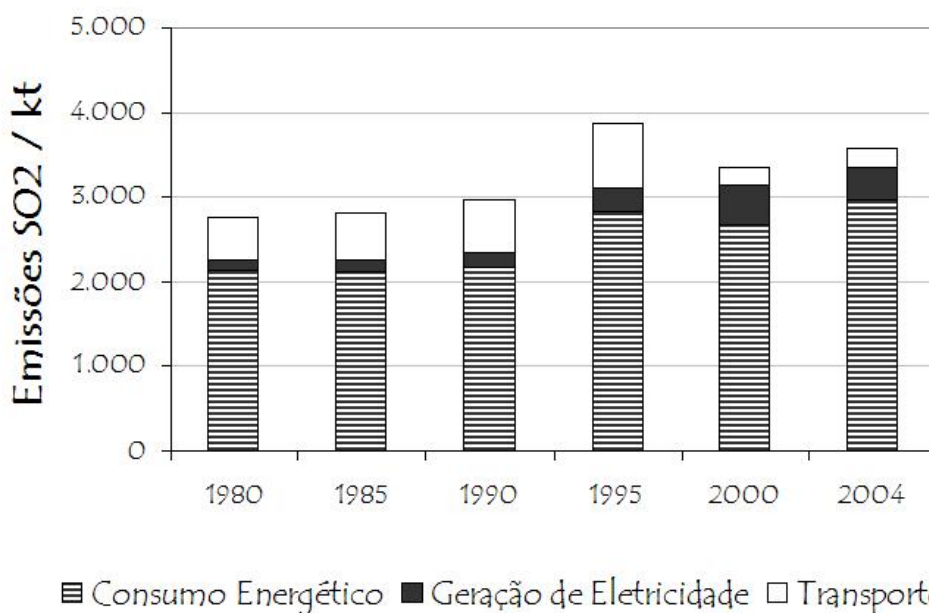


FIGURA 8 - EMISSÕES SETORIAIS DE DIÓXIDO DE ENXOFRE (KT) – 1980 - 2000

Fonte: Adaptado de Cima, 2006.

Emissões Setoriais de NO_x (kt) – 1980-2000

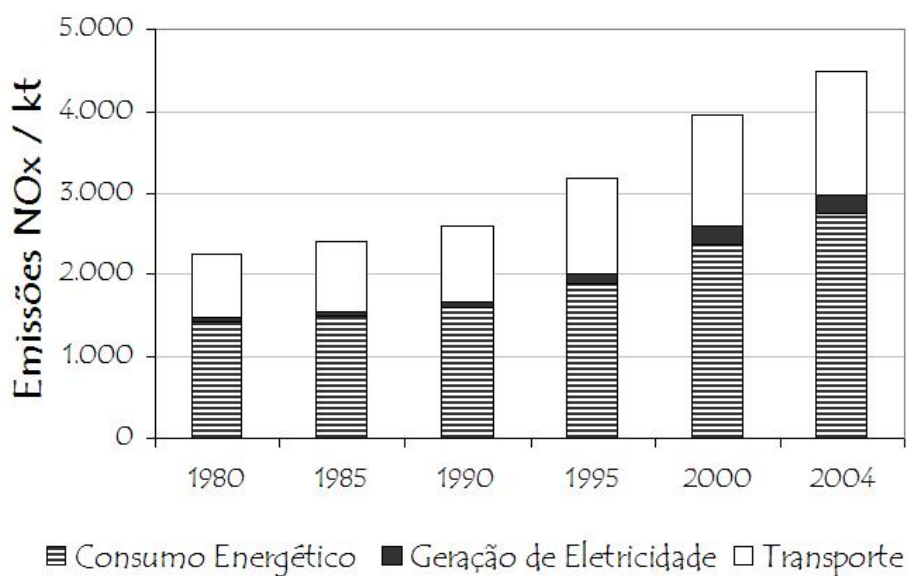


FIGURA 9 - EMISSÕES SETORIAIS DE NOX (KT) – 1980-2000

Fonte: Adaptado de Cima, 2006.

Cotas e metas de redução de emissão de gases de efeito estufa, sobretudo o CO₂, foram estabelecidas pelo Protocolo de Quioto, mais especificamente 5,2% de redução com base nas emissões do ano de 1990. Temos assim, um dos principais desafios de substituição do uso de recursos energéticos de origem fóssil por fontes energéticas renováveis ou de baixo potencial emissor. É importante ressaltar, contudo, que esta meta foi estabelecida apenas para os países desenvolvidos, sendo os demais países responsáveis por auxiliar aqueles no cumprimento das metas no período 2008 a 2012.

Para casos de países desenvolvidos, onde a participação dos combustíveis fósseis na matriz energética é significativa, o Protocolo de Quioto prevê mecanismos de flexibilização para a redução das emissões de carbono sem prejudicar o desenvolvimento. Dentre os mecanismos de flexibilização previstos neste Protocolo destaca-se, pela sua aplicabilidade no Brasil, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) que antevê projetos de retenção de carbono em países em desenvolvimento e comercialização de certificados de reduções de emissões. Essas se constituem como interessantes oportunidades para o setor industrial brasileiro.

2.3 Indicador 3: Capacidade de Autogeração de Energia (AG)

Apesar da generalidade do termo, segurança energética pode ser entendida como a capacidade do fornecimento contínuo de energia de forma adequada, em quantidades suficientes e a preços acessíveis (UNDP, 2000 *apud* CIMA 2006).

A capacidade de expansão e confiabilidade de operação dos sistemas energéticos que moldam os padrões de uso da energia nas sociedades, associada à escassez ou indisponibilidade de acesso a fontes primárias de energia, justifica, segundo Blyth e Lefevre (2004) *apud* Cima (2006), as preocupações com relação à segurança energética.

De acordo com Cima (2006), a energia constitui-se como fator limitante do processo de industrialização e do crescimento econômico, sendo a disponibilidade e o acesso aos recursos energéticos de fundamental importância. Destaca-se, nesse sentido, o indicador de segurança energética, tendo em vista a vulnerabilidade do setor industrial quanto a rupturas no fornecimento de energia.

No caso do setor industrial, Velazquez (2000) aborda que muitas vezes tem se examinado a co-geração² preferencialmente como uma alternativa de auto-suficiência, aparecendo a maior eficiência na conversão dos combustíveis em eletricidade e calor como objetivo secundário. Acrescenta-se a isso também, o fato deste mecanismo promover uma redução nos custos do insumo de energia nos

² A co-geração pode ser definida com a geração coincidente de calor e potencia elétrica e/ou mecânica, ou a recuperação de calor de processo rejeitado a altas temperaturas para a produção de potência. (Bajay, 1989 *apud* Velazquez, 2000).

processos industriais. Além destas perspectivas, Geller (2003) destaca ainda o potencial da co-geração no aproveitamento de resíduos de processo, tal como o bagaço de cana. Velazquez assegura que:

Sistemas de co-geração são considerados modalidades de auto-produção complexos, pois além de garantir todos os benefícios da geração própria também permitem reduções significativas de custos de produção dos processos. (VELAZQUEZ, 2000)

Apesar de não ser uma nova tecnologia, sendo longamente praticada em alguns setores, a co-geração teve no passado seu emprego limitado pela dificuldade de competir com a energia elétrica oferecida pelo sistema convencional, associado a instalações geradoras de grande porte e políticas agressivas das concessionárias. Novos projetos na indústria somente foram viabilizados após a maior oferta de gás natural e a disponibilização de novas tecnologias de conversão de calor. (VELAZQUEZ, 2000)

2.4 Indicador 4: Medidas de Racionalização de Consumo (RC)

O conceito de eficiência energética relaciona-se à minimização de perdas na conversão de energia primária em energia útil. As perdas ocorrem para qualquer tipo de energia, seja térmica, mecânica ou elétrica. Na matriz energética brasileira, o uso eficiente da energia nunca foi fator prioritário. Entretanto, aumentar a eficiência com que a energia é utilizada ou promover a eficiência energética e a conservação de energia deve ser sempre um objetivo a ser alcançado. (CAPRIGLIONE, 2006)

De acordo com Santos *et all* (2006), o aumento da eficiência dos equipamentos e as alterações estruturais do consumo de energia contribuíram para o aumento do rendimento médio, cerca de 60%, em 6 pontos percentuais. Ressaltam-se, nesse sentido, o maior uso de gás natural e da eletricidade, além do maior crescimento de segmentos industriais mais eficientes em termos energéticos. É importante salientar ainda a expansão do setor industrial com a instalação de plantas industriais mais eficientes que as existentes.

A COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (COPEL) (2005) relaciona algumas vantagens da implementação de melhorias no rendimento das instalações elétricas para a indústria. No caso da indústria, ressalta a melhora do aproveitamento das instalações e equipamentos, com conseqüente melhoria na qualidade do produto, a redução do consumo energético e conseqüente aumento da produtividade sem afetar a segurança, além da redução das despesas com eletricidade.

Há que se ressaltar, entretanto, que a promoção da eficiência energética extrapola o contexto industrial. De acordo com a COPEL (2005), isto se explica pela redução dos investimentos para a construção de usinas e redes elétricas e, conseqüentemente, redução dos custos da eletricidade, além da redução dos preços de produtos e serviços. Acrescenta-se a isso, ainda, a maior garantia de fornecimento de energia elétrica e de atendimento a novos consumidores no futuro.

Dentre os usos de energia final no setor industrial, destacam-se, de uma maneira geral, o *aquecimento direto* e *calor de processo* como aqueles cujo potencial de economia de energia são mais expressivos. De acordo com o MME (2005), o aquecimento direto é uma das aplicações da energia mais freqüentes e diversificadas, sendo o rendimento energético dependente do setor, tipo de equipamento e insumo energético, além das condições de operação. Já o uso de energia final em *Calor de Processo* é uma das aplicações mais genéricas da energia, incluindo a geração de vapor, o aquecimento de água e de fluidos térmicos, destacando-se as indústrias de transformação como seus grandes usuários. Dentre as estratégias de redução do consumo de energia, os estudos de Geller (2003) sugerem um potencial de 10% em fornos e caldeiras elétricas.

A utilização de energia para força motriz envolve aquela usada em motores estacionários ou de veículos de transporte individual ou coletivo, de carga, tratores, máquinas agrícolas, máquinas de terraplenagem e de movimentação de terras. O potencial de economia relacionado à força motriz estimado por Geller (2003) é de 2 a 8 % de economia, dependendo do tamanho do motor e considerando apenas o estabelecimento do padrão de eficiência. O controle de velocidade em motores também se apresenta como estratégia de economia de energia, sendo 8% as estimativas de Geller (2003) para a redução do consumo industrial.

Ainda em relação à força motriz, destaca-se a substituição de motores superdimensionados como uma medida de baixo custo. Pesquisas de Geller (2003) indicam que cerca de 40% dos motores operavam com carregamento abaixo de 60%.

Outros tipos de uso de energia final de potencial de economia energética menos expressivos no setor industrial são a refrigeração e o ar-condicionado. A utilização do primeiro refere-se à necessidade de refrigerar equipamentos industriais, enquanto o último relaciona-se a setores industriais em que os processos são mais automatizados, ou requerem maior precisão dimensional. (MME, 2005)

O uso de energia em processos eletroquímicos na indústria aparece basicamente em processos de galvanoplastia, de eletroforese e de eletrodeposição. De acordo com o MME (2005), as referências sobre o valor absoluto do rendimento energético desses processos são escassas, sendo a evolução do rendimento ao longo do tempo, avaliada pela variação do consumo específico. Geller (2003) cita como exemplo às estimativas de uma redução possível de 6,5% do setor de alumínio, além dos progressos do setor de soda-cloro.

De acordo com Geller (2003), no caso do uso final de energia para iluminação, o racionamento de energia elétrica em 2001 demonstrou as facilidades de implantação de medidas de economia de energia a partir de uma combinação de ações, que foram desde a simples substituição de lâmpadas até a elaboração de projetos otimizados de iluminação, usando luminárias de alta eficiência e propiciando melhor aproveitamento da luz natural, com desligamentos automáticos por sensores de presença, e ainda, adequando os níveis de iluminação ambiental.

3 METODOLOGIA

A sustentabilidade energética industrial pressupõe o suprimento de energia para manutenção do crescimento econômico do setor, considerando os custos, benefícios sociais e ambientais das alternativas relacionadas com as atividades de produção e consumo de energia. Assim, este trabalho apresenta uma proposta de índice de sustentabilidade energética industrial para fins de avaliação, monitoramento e comparação do nível de sustentabilidade energética de indústrias brasileiras de diferentes setores produtivos.

O índice de sustentabilidade energética industrial (SEI) é derivado de uma pesquisa bibliográfica acerca de indicadores energéticos de bases internacionais e nacionais. Para tanto, são adotados os indicadores autogeração de energia (AG), difusão de energias renováveis (ER), controle de emissões (CE) e racionalização do consumo de energia (RC). A interação entre dois indicadores enfatiza uma determinada esfera da Sustentabilidade Energética Industrial: Segurança Energética (ER x AG); Impacto Ambiental (ER x CE); Eficiência Energética (RC x AG) Matriz Energética Limpa (ER x CE). Assim, o índice SEI é estimado pelo somatório desses produtos ponderado por um fator de dois para fins de obtenção dos resultados em percentuais. (FIGURA 10)

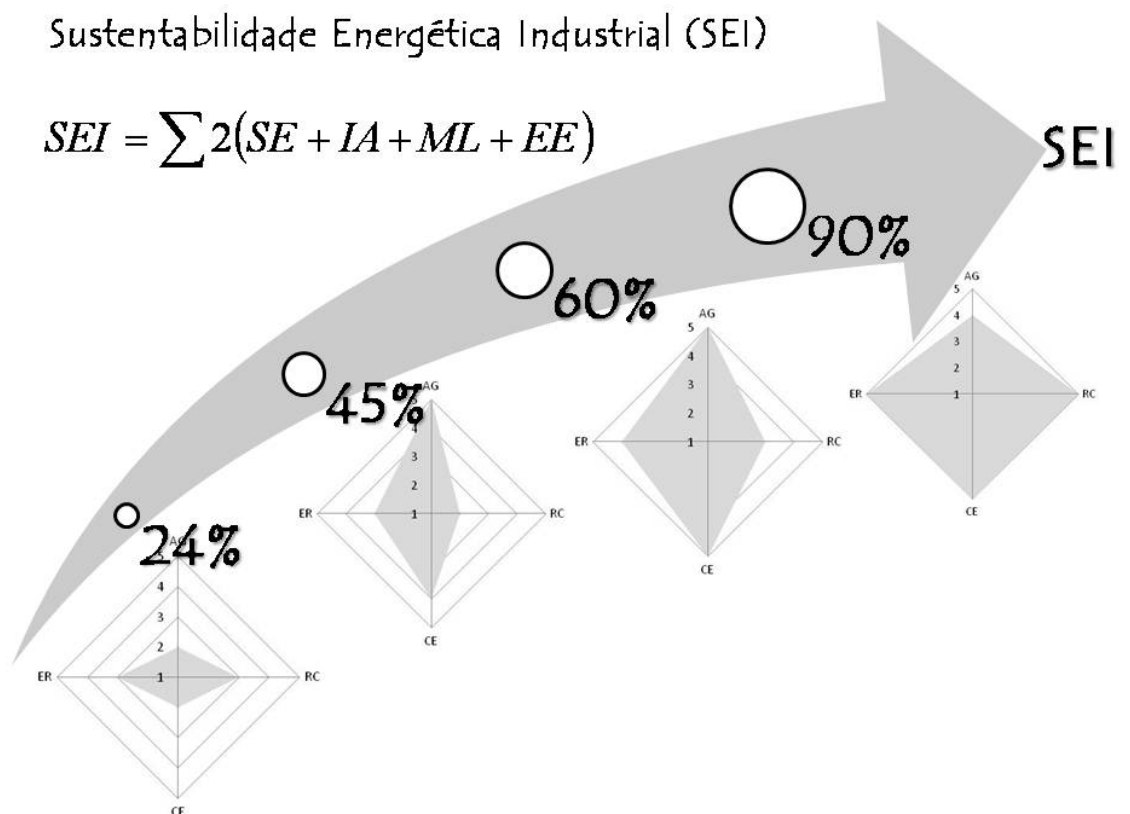


FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL

Fonte: Elaboração própria.

Os níveis de sustentabilidade energética industrial (SEI) são definidos em consonância com o índice de sustentabilidade ambiental (ISA) apresentado por Torres e Gama (2006). Níveis intermediários para a Sustentabilidade Energética Industrial são classificados como muito baixa (SEI < 25) baixa ($25 \leq \text{SEI} < 50$), moderada ($50 \leq \text{SEI} < 75$), e alta ($75 \leq \text{SEI} \leq 100$). (FIGURA 11).

Obteve-se a quantificação das componentes principais do índice SEI pela atribuição de valores de 1 a 5 aos níveis encontrados para cada um dos indicadores - níveis de auto-geração (AG), controle de emissões (CE), difusão de energias renováveis (ER) e racionalização de consumo de energia (RC). No primeiro caso, a atribuição dos pesos é realizada para a participação (em termos percentuais) da autogeração no total de energia consumida por uma determinada unidade industrial. A difusão de energias renováveis é avaliada, também em termos percentuais, pela representatividade dessas na matriz energética da empresa. (FIGURA 12) De maneira distinta, no caso de controle de emissões e racionalização do consumo de energia, faz-se uma avaliação qualitativa do estágio atual das iniciativas implementadas nas unidades industriais. (FIGURA 13)

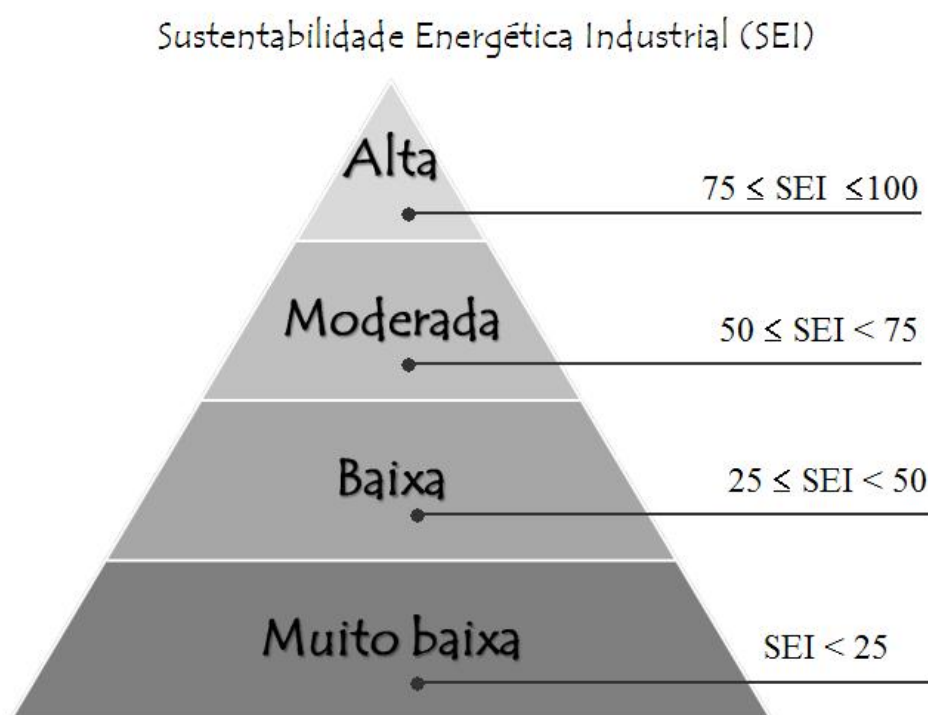


FIGURA 11 - NÍVEIS DE SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL

Fonte: Elaboração própria.

Indicador 01: Autogeração de Energia (AG)

1	◊ AG < 25%
2	◊ 25% ≤ AG < 50%
3	◊ 50% ≤ AG < 75%
4	◊ 75% ≤ AG < 100%
5	◊ AG ≥ 100%

(A)

Indicador 2 – Difusão Energias Renováveis

1	◊ ER < 20%
2	◊ 20% ≤ ER < 40%
3	◊ 40% ≤ ER < 60%
4	◊ 60% ≤ ER < 80%
5	◊ 80% ≤ ER ≤ 100%

(B)

FIGURA 12 - VALORES ATRIBUÍDOS AO INDICADOR AUTOGERAÇÃO DE ENERGIA (A) e DIFUSÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS (B)

Fonte: Elaboração própria.

Indicador 3 – Controle de Emissões

1	◊ Não quantifica emissões
2	◊ Inventário emissões (concluído)
3	◊ Reduções estimadas (Projetos MDL aprovados)
4	◊ Reduções quantificadas
5	◊ Metas e legislações atendidas

(A)

Indicador 4 – Racionalização de Consumo de Energia

1	◊ Não quantifica perdas de energia
2	◊ Inventário consumo energia
3	◊ Projetos Eficiência Energética
4	◊ Reduções quantificadas
5	◊ Metas atendidas

(B)

FIGURA 13 - VALORES ATRIBUÍDOS AO INDICADOR CONTROLE DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS (A) E RACIONALIZAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA (B)

Fonte: Elaboração própria.

O diagnóstico da sustentabilidade energética industrial foi realizado para empresas de segmentos do setor industrial que merecem acompanhamento e tratamento específico, sendo esses setores: alumínio, cimento, papel e celulose, petroquímica e siderurgia. Tais setores são grandes consumidores industriais, respondendo por quase metade de toda a demanda industrial por energia elétrica. (FIGURA 14)

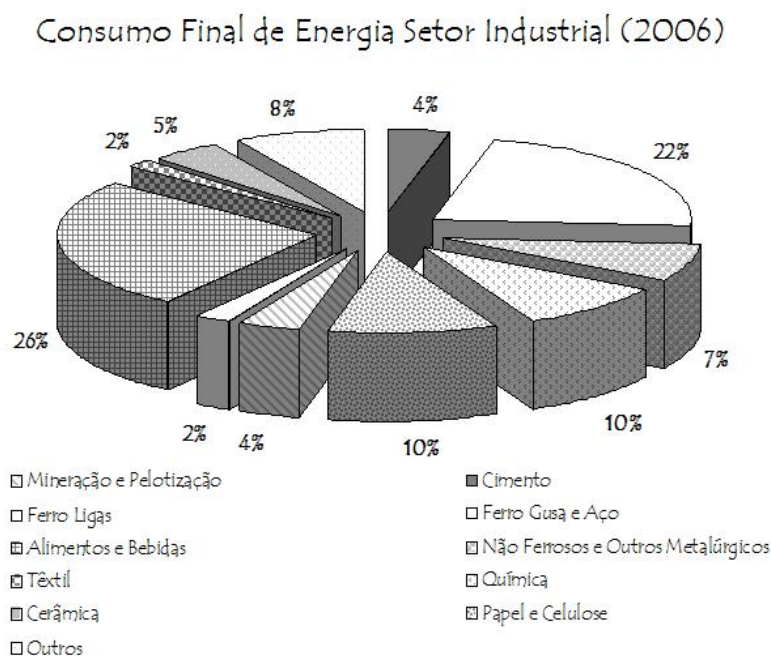


FIGURA 14 – CONSUMO FINAL DE ENERGIA DO SETOR INDUSTRIAL (2006)

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do MME(2007).

Assim, serão realizados estudos de caso das empresas Alcoa, Holcim, Aracruz Celulose, Suzano Petroquímica e Arcelor Mittal, em que são apresentados os processos produtivos, com destaque para os insumos e produtos energéticos. Os dados para avaliação do perfil de Sustentabilidade Energética Industrial foram obtidos via pesquisa bibliográfica, mais especificamente nos Relatórios de Sustentabilidade publicados anualmente pelas próprias empresas. (FIGURA 15)



FIGURA 15 – SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL: ESTUDOS DE CASO

Fonte: Elaboração própria.

4 DIAGNÓSTICO DA SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL

4.1 Indústria de Alumínio

A matéria-prima básica na produção do alumínio é a bauxita, metal rico em alumina, além de óxidos de ferro, silício e outros componentes em menor escala. Para o diagnóstico da sustentabilidade energética industrial na indústria de alumínio, faz-se necessária uma breve descrição do processo de produção que engloba basicamente três etapas: a mineração e o beneficiamento da bauxita, o refino e a redução eletrolítica da alumina. (FIGURA 16)

De acordo com a EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE - (2005), a etapa de refino envolve a transformação da bauxita em alumina. Para tanto, utiliza-se a dissolução do minério em banho aquecido de soda cáustica sob pressão, em que são separadas as impurezas insolúveis de óxido de ferro, silício e outras substâncias, por precipitação e filtragem. À precipitação do hidrato de alumina por resfriamento segue a calcinação a alta temperatura, obtendo alumina. Processos eletrolíticos a alta temperatura provocam a ruptura da molécula de alumina, alumínio e oxigênio. Essa etapa de produção do alumínio, denominada redução, é extremamente intensiva em consumo de energia elétrica. Esse consumo na produção de alumínio primário do país representa cerca de 5% da carga total de eletricidade do Sistema Interligado Nacional. Assim, as plantas industriais de alumínio primário localizam-se preferencialmente em regiões com oferta abundante de energia elétrica e, se possível, próximas a jazidas de bauxita.

No Brasil, a produção de alumínio primário está concentrada em seis grandes grupos empresariais- Albrás, Alcan, Alcoa, Valesul/CVRD, BHP Billiton e CBA - Cia. Brasileira de Alumínio/Votorantim- com sete plantas industriais: Albrás (PA), Alcan/Ouro Preto (MG), Alcan/Aratu (BA), Alcoa/Poços de Caldas (MG), Alumar - Alcoa/BHP Billiton (MA), Valesul (RJ) e CBA/Votorantim (SP). (EPE, 2005)

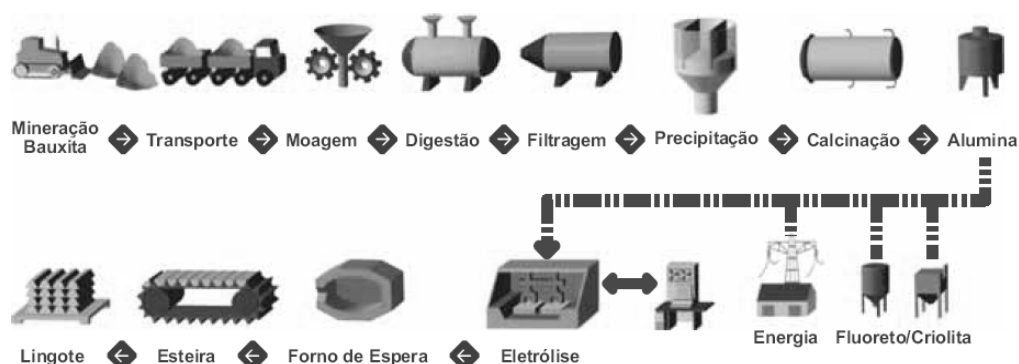


FIGURA 16 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO PRODUTIVO DE ALUMÍNIO

Fonte: ABAL, (2005)

Desde 1990, o consumo final de energia elétrica do segmento não-ferrosos, que inclui a indústria de alumínio, é aproximadamente 8% do total de energia consumida pelo setor industrial (FIGURA 17). Historicamente, o insumo energético mais utilizado é a eletricidade, cerca de 50%, seguida do óleo combustível e outras fontes derivadas de petróleo (FIGURA 18).

Em 2000, iniciou-se a introdução do gás natural na matriz energética do setor, sendo essa participação ainda tímida em 2006: cerca de 10%. Assim, o segmento apresenta-se ainda, dentro do setor industrial, como um dos maiores consumidores de eletricidade: cerca de 60% em 2006. (FIGURA 19)

De acordo com EPE (2005), tem-se verificado nos últimos anos uma tendência crescente dos produtores de alumínio tornarem-se Produtores Independentes de Energia – PIE's ou participarem em consórcios de geração de energia, principalmente em empreendimentos hidroelétricos, o que garantiu em 2004 uma potência totalizada em 2.056 MW. Os investimentos em autoprodução são justificados pela dependência da produção de alumínio primário em relação ao insumo energia elétrica.

Evolução do Consumo Final do Setor Não Ferrosos

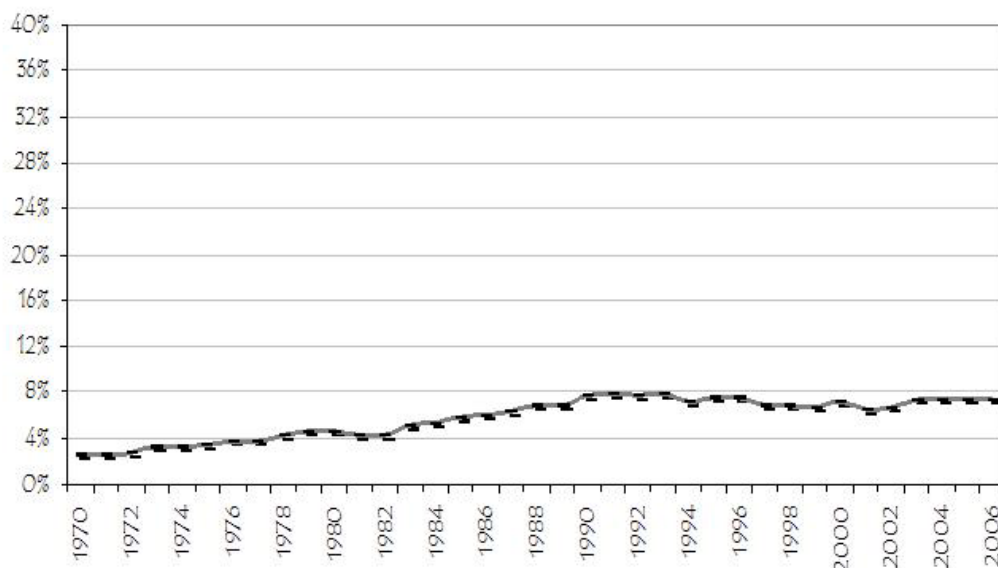


FIGURA 17 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO FINAL DE ENERGIA DO SEGMENTO NÃO FERROSOS RELATIVO AO TOTAL DO SETOR INDUSTRIAL

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do MME (2007)

Evolução da Matriz Energética – Setor Não Ferrosos

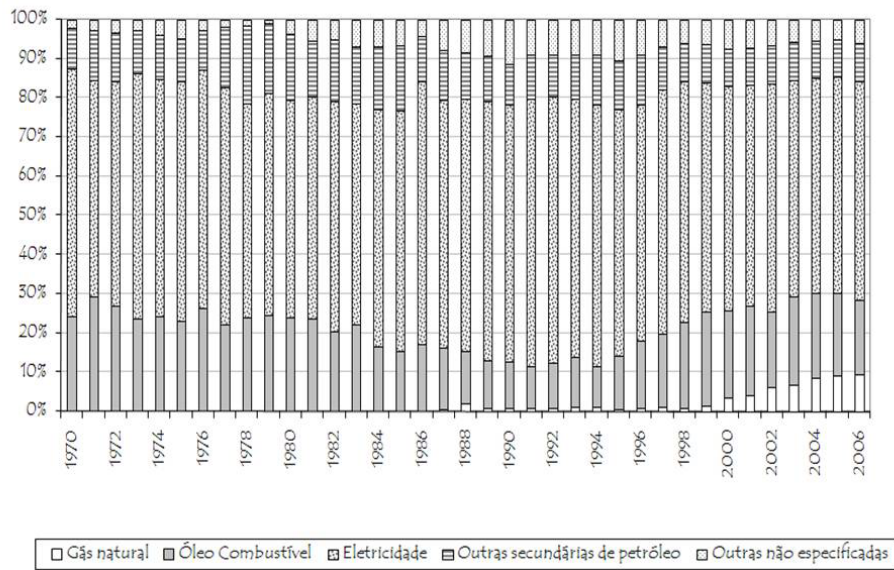


FIGURA 18 – EVOLUÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA DO SETOR NÃO FERROSOS

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do MME (2007).

Matriz Energética do Setor Não Ferrosos (2006)

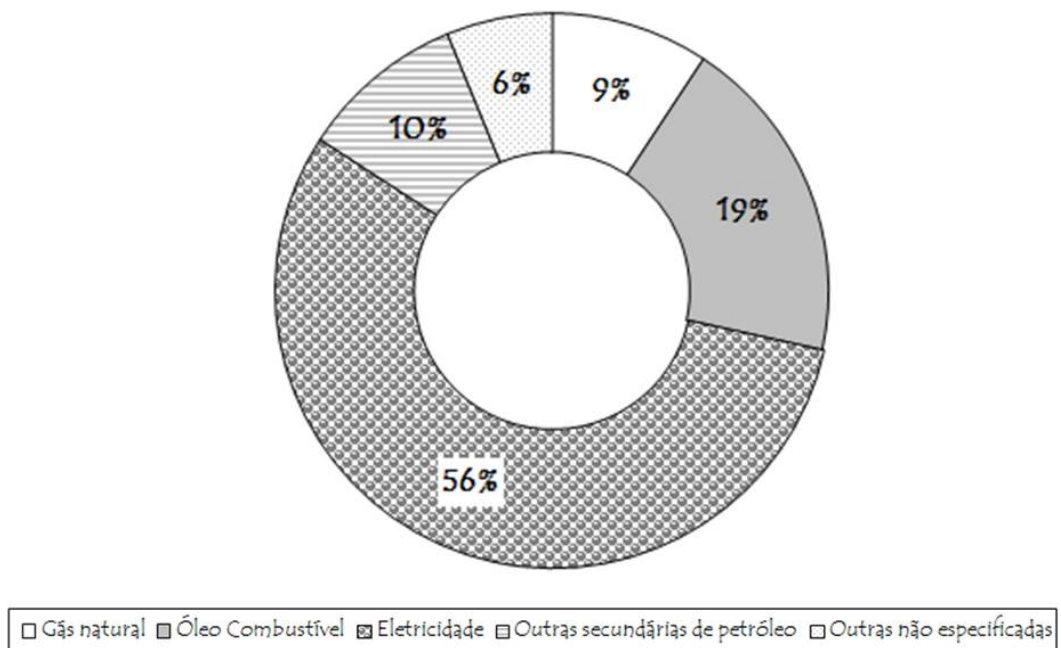


FIGURA 19 – MATRIZ ENERGÉTICA DO SETOR NÃO FERROSO. FONTE: ELABORAÇÃO PRÓPRIA A PARTIR DOS DADOS DO MME (2007). ALCOA S.A

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do MME (2007).

4.1.1. ALCOA S.A.

Uma das empresas que mais atua na produção de alumínio primário no Brasil é a Alcoa S.A. Esta empresa atende aos mercados aeroespacial, automotivo, transporte comercial, construção, embalagens e variados segmentos industriais, fornecendo matéria-prima, produtos acabados e serviços de projeto, engenharia e produção. Dentre os quais estão, por exemplo, os chicotes elétricos, o alumínio primário, alumina, pó de alumínio, os produtos químicos, as embalagens, tampas, preformas, as garrafas plásticas, o carboneto de silício, alumina eletrofundida, extrudados de alumínio e embalagens flexíveis. Assim, suas operações estão distribuídas em unidades por vários estados brasileiros. (FIGURA 20)



FIGURA 20 - UNIDADES INDUSTRIAIS DA ALCOA NO BRASIL

Fonte: ALCOA (2003).

O processo de produção do alumínio (FIGURA 21) da ALCOA apresenta alguns desafios, tais como a eficiência energética, o acesso a recursos naturais (como a bauxita, por exemplo), a eco-eficiência, o incremento da reciclagem e a redução dos resíduos e das emissões atmosféricas. (ALCOA, 2004)



FIGURA 21 - FLUXO DE PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO

Fonte: ALCOA (2004)

A estratégia de meio ambiente da Alcoa no Brasil segue os princípios do desenvolvimento sustentável. Assim, todas as unidades da empresa apresentam metas de eco-eficiência, monitoradas por indicadores, nas quais se incluem medidas de redução do consumo e de emissões, substituição de materiais, reciclagem, maximização do uso de recursos naturais e melhoria de produtos e serviços em termos de impactos ambientais. (ALCOA 2002)

A produção do alumínio é considerada uma atividade eletro-intensiva, requerendo grande quantidade de energia para viabilizar suas operações (FIGURA 22). A Alcoa está entre os maiores consumidores de eletricidade no Brasil. No Maranhão, o consórcio Alumar é o principal usuário individual de energia elétrica do Estado. As unidades produtoras de alumínio da ALCOA consomem cerca de 600 MW médios de energia ou o correspondente a aproximadamente 1,4% da energia nacional consumida em todo o sistema interligado em 2003. De acordo com a Alcoa (2006), os gastos com energia representam mais de 30% do valor empregado para produzir o metal. Assim, a energia ainda é o gargalo do processo produtivo do alumínio, tornando fundamental o fornecimento contínuo de energia elétrica a custos competitivos.



FIGURA 22 - ABASTECIMENTO DE ENERGIA ALCOA
 Fonte: ALCOA (2007)

Diante desse contexto, a Alcoa atua em duas vertentes: ações que aumentam a eficiência do uso da energia elétrica no processo produtivo e medidas que reduzam o custo de aquisição da energia elétrica. Assim, as estratégias da empresa incluem melhoria de eficiência operacional através de investimentos em novas tecnologias, bem como de investimentos em autogeração por meio da participação em consórcios na construção de usinas hidrelétricas concedidas em licitação pelo governo brasileiro. (TABELA 2)

TABELA 2 - AUTOGERAÇÃO NA ALCOA- USINAS HIDRELÉTRICAS

Projeto	Localização	Capacidade Instalada,	Participação da Alcoa
		[MW]	[%]
Machadinho	Rio Pelotas, SC/RS	1140	22,61
Barra Grande	Rio Pelotas, SC/RS	690	42,18
Serra do Facão	Rio São Marcos, GO	210	39,47
Paiquerê	Rio Pelotas, SC/RS	292	35,00
Estreito	Rio Tocantins, MA/TO	1087	19,08

Fonte: ALCOA (2007)

De acordo com a Alcoa (2007), os projetos de autogeração mostram-se uma opção positiva por diversos fatores que vão desde a segurança de fornecimento de energia elétrica com preços competitivos no longo prazo, até mesmo a liberação de energia do Sistema Integrado Nacional para o conjunto da sociedade. Com participação de 23% na hidrelétrica de Machadinho e de 42% na hidrelétrica de Barra Grande, ambas situadas na divisa entre os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, a Companhia atualmente possui 40% de auto-suficiência energética com previsão de 70% para ano de 2011 (FIGURA 23). De acordo com a Alcoa (2007), o consumo médio específico de energia elétrica da

empresa é 14,5 kWh/kg de alumínio, inferior à média mundial, que é de 15,2 kWh/kg de alumínio. Além da energia elétrica, a Alcoa também utiliza, como insumos energéticos no processo do alumínio, o coque e o óleo BPF. (Figura 24)

Segurança Energética na Alcoa Brasil

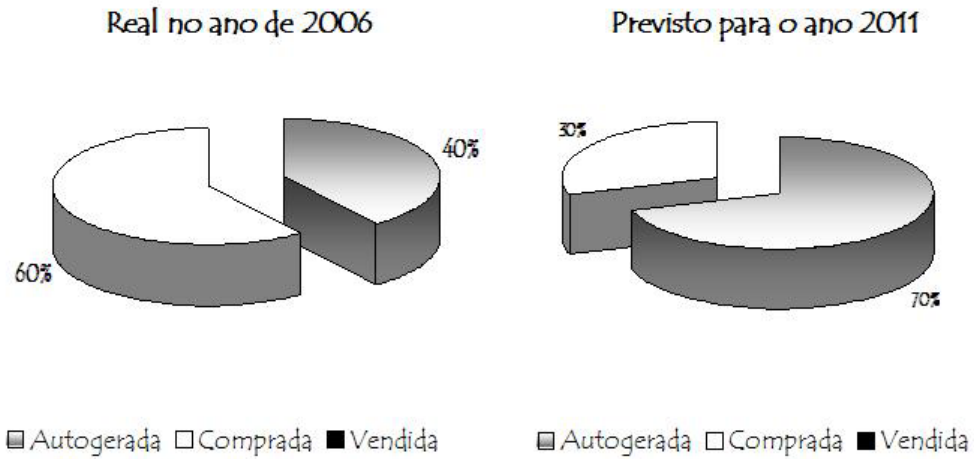


FIGURA 23 – SEGURANÇA ENERGÉTICA NA ALCOA BRASIL
 Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da Alcoa (2007)

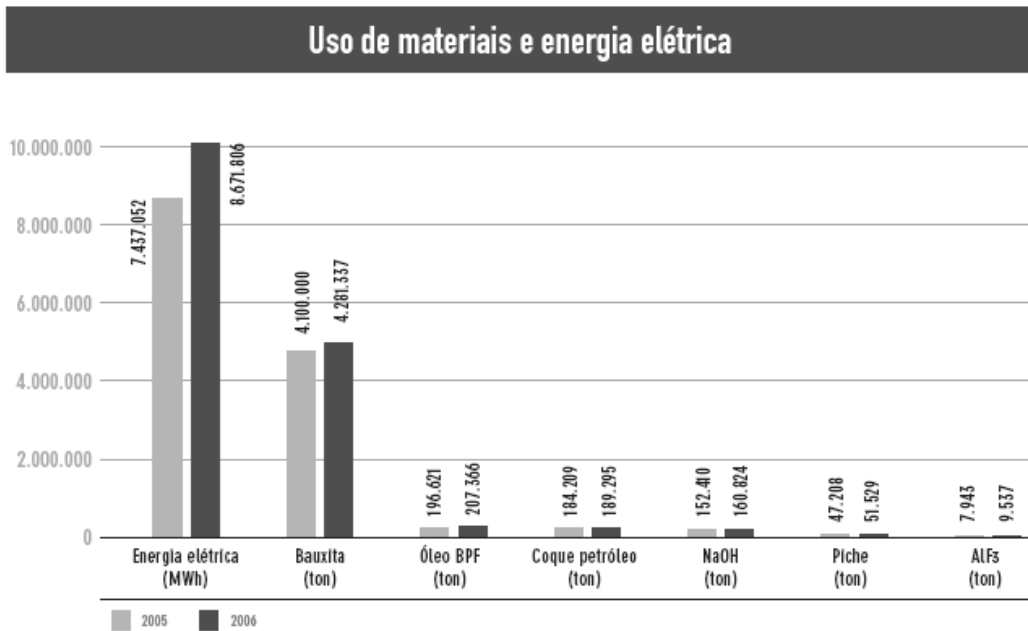


FIGURA 24 - USO DE MATERIAIS E ENERGIA ELÉTRICA NA ALCOA.
 Fonte: ALCOA (2007)

Iniciativas de difusão de combustíveis renováveis na Alcoa também podem ser observadas no setor de transporte, no qual se verifica a substituição parcial de combustível fóssil por biocombustível na frota de veículos industriais, mais especificamente por meio do uso do biodiesel B-20. Esse processo, atualmente, está em fase de construção da infra-estrutura para mistura e estocagem do B-20 nas plantas de produção do alumínio da Alcoa. Pretende-se, assim, que todos os veículos das unidades industriais utilizem o biocombustível.

A utilização do biodiesel em unidades da Alcoa não é restrita a etapa de transporte. A Alumar, por exemplo, tornou-se uma das primeiras empresas do setor de alumínio a utilizar o biodiesel como combustível para os fornos de cozimento de anodos. De acordo com a Alcoa (2007), a utilização do biodiesel do tipo B2 (óleo diesel que contém 2% de biodiesel produzido a partir da mamona) reduz o consumo de combustíveis não renováveis, além de diminuir as emissões de substâncias como SO₂ (dióxido de enxofre), hidrocarbonetos e material particulado.

A substituição de combustíveis para controle de emissões também é verificada na unidade de Itapissuma (PE). Nesse caso, temos a substituição de óleos combustíveis por gás natural nas caldeiras representando uma redução de 90% nas emissões de compostos orgânicos voláteis (COVs). Podemos salientar, ainda, o desempenho da unidade de Utinga, Santo André/SP, que eliminou totalmente as emissões de SO₂. A Alcoa (2007) também destaca as iniciativas de substituição de combustíveis na refusão, em Santo André (SP) e na AFL, em Itajubá (MG), que trocaram o óleo por gás natural, e ainda a troca do querosene pelo óleo refinado, na laminação em Itapissuma (PE).

Outra estratégia da Alcoa para redução do consumo de energia e controle de emissões atmosféricas é o projeto de redução da opacidade em fornos de cozimento de anodo de carbono¹ a partir de tecnologias para monitoramento e controle de combustão. Baseada em leitura de temperatura por meio de sensores infravermelhos, a implantação dessa tecnologia propiciou redução de 50% no nível de opacidade dos fornos e redução de 3,18% na taxa de consumo de óleo e na emissão de gás carbônico (CO₂), em comparação com os fornos que não utilizam essa tecnologia. (ALCOA, 2007)

As emissões atmosféricas estão diretamente associadas à estabilidade dos processos produtivos de alumina e de alumínio, que geram, principalmente, emissões de dióxido de enxofre (SO₂), fluoretos, perfluorcarbonos (PFCs) e compostos orgânicos voláteis (COVs). Assim, a Alcoa realiza inventários

¹ De acordo com a Alcoa (2007), o anodo de carbono é utilizado no processo eletrolítico para a redução de alumina em alumínio, sendo que seu cozimento em altas temperaturas faz parte do processo de preparação para adquirir as características necessárias.

periódicos de suas emissões atmosféricas (FIGURA 25), além de buscar novas tecnologias para seu controle e/ou redução. Segundo a Empresa (2007), a mesma cumpriu em 2004 a meta de reduzir em 25% a emissão de gases de efeito estufa, prevista inicialmente para ser alcançada apenas em 2010. Assim, a Alcoa atualmente procura identificar quais de seus projetos têm potencial de venda de créditos de carbono, de acordo com as regras do Protocolo de Quioto.

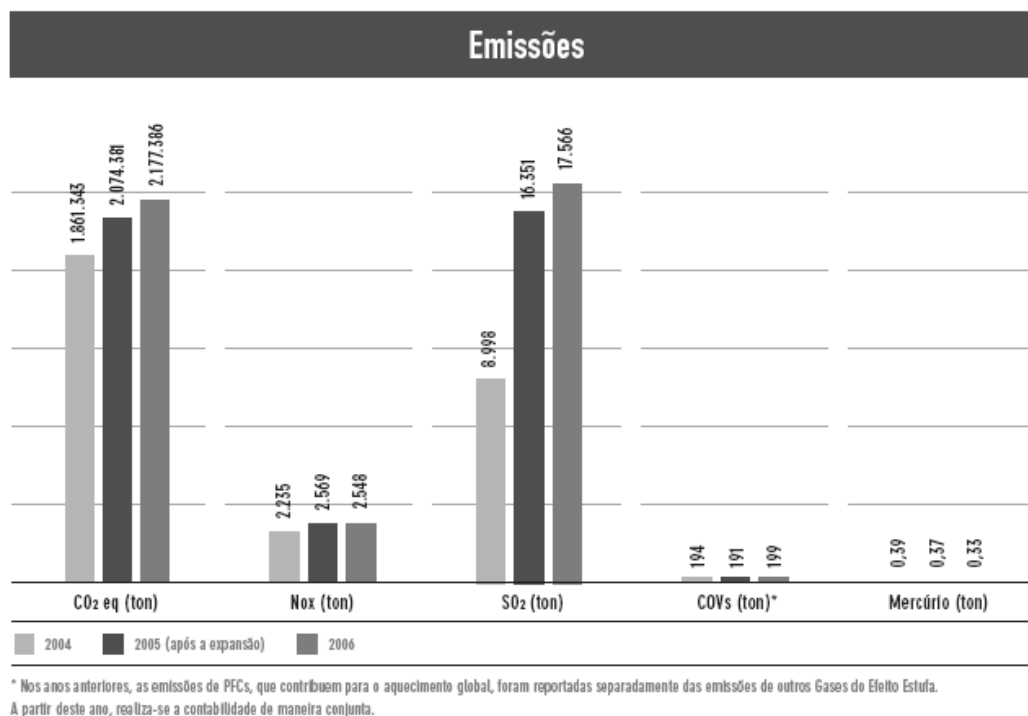


FIGURA 25 – INVENTÁRIO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS NA ALCOA.
Fonte: ALCOA (2007)

De acordo com a Alcoa (2007), a produção do alumínio tornar-se-á neutra em termos de emissões de gases causadores do efeito estufa em 2017. Para tanto, a empresa conta com a compensação da quantidade de emissões de dióxido de carbono evitadas pela sua utilização no setor de transportes, bem como pelo maior uso de metal reciclado. A reciclagem do alumínio requer menos de 5% da energia usada para sua produção a partir do minério da bauxita.

Finalizando, é válido destacar ainda as iniciativas de reaproveitamento e reciclagem de resíduos (FIGURA 26) nas unidades da Alcoa, em que 85% dos resíduos são reutilizados ou reciclados. Na Alumar, por exemplo, 80% do pó de carbono - resíduo gerado na operação de eletrodos - são reaproveitados, sendo parte vendida a empresas que utilizam o material como fonte de energia ou matéria-

prima. Assim, inclui-se nessa estatística o fornecimento de resíduos a outros processos industriais, tal como a indústria cimenteira. (ALCOA, 2007).

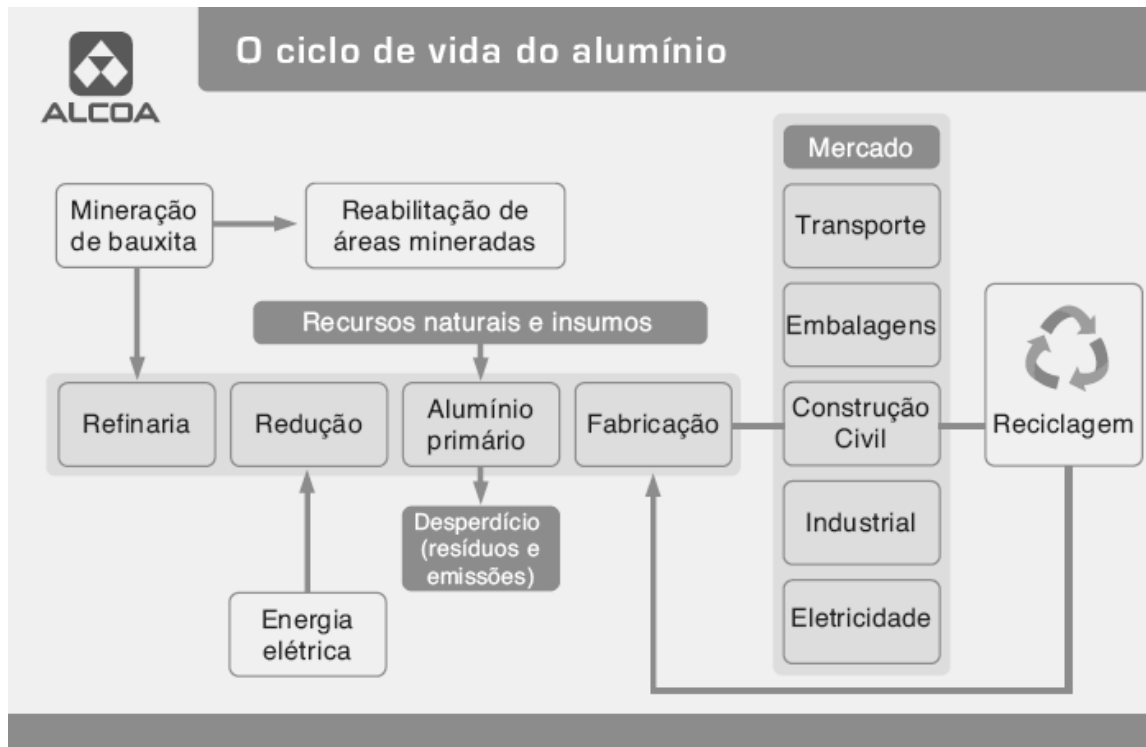


FIGURA 26 - O CICLO DE VIDA DO ALUMÍNIO

Fonte: ALCOA (2004)

4.2 Indústria de Cimento

Para fins do diagnóstico da sustentabilidade energética industrial no segmento de cimento, faz-se necessária uma breve descrição do processo de produção de cimento. De acordo com Carpio (2005), o denominador comum dos principais tipos de processos produtivos de cimento envolve as etapas de extração, de britagem e preparação das matérias-primas, de preparação dos combustíveis, da queima do clínquer, da moagem do cimento e expedição.

A extração das matérias-primas naturais em minas lindeiras à planta industrial marca o início do processo de produção do cimento, que prossegue com a britagem na própria pedreira e transporte para a unidade industrial, onde serão estocadas e homogeneizadas para preparações posteriores. A adequação da composição química da mistura envolve a adição de materiais corretivos, tais como bauxita, minério de ferro ou sílica, sendo esta adição em função das necessidades do processo, assim como a inclusão das especificações do produto. Nesta etapa do processo, matérias-primas alternativas de origem industrial podem ser utilizadas em quantidade limitada como substitutos das matérias-primas principais e corretivas. De acordo com Cembureau (1999) - *apud* Carpio (2005) - essa adição de matérias-primas alternativas, comumente, ocorre de maneira direta no seu próprio sistema de preparo na fábrica de cimento.

O processo prossegue com a etapa de preparação das matérias-primas, cujas rotas tecnológicas básicas são por via úmida ou por via seca. Carpio (2005) aborda que no primeiro caso, a matéria-prima é moída juntamente com a água, cujo conteúdo de umidade pode atingir valores entre 28 e 43% em peso. O produto resultante, a pasta, é estocado e posteriormente homogeneizado em silos, para alcançar e manter a composição química necessária antes de entrar no forno de produção de clínquer. Nestes fornos, é necessário o fornecimento de energia em excesso para evaporação da água contida na matéria-prima. De maneira distinta, no processo por via seca, não se utiliza água na moagem da matéria-prima, sendo a umidade reduzida àquela da própria matéria-prima, isto é, inferior a 1%. Assim, esta é fornecida ao forno em forma de um pó fino, chamado “cru”.

Cembureau (1999), *apud* Carpio (2005), apresenta uma proporção de aproximadamente 1,5 a 1,6 toneladas de matéria-prima seca para produção de 1,0 tonelada de clínquer. Assim como as matérias-primas, os combustíveis para alimentação do forno de cimento também passam por processos de moagem, secagem, homogeneização e estocagem. Temos assim mais uma etapa relativa ao processo de preparo dos combustíveis.

A matéria-prima preparada é introduzida no forno de cimento, ficando sujeita ao processo de tratamento térmico marcado por etapas consecutivas de secagem, pré-aquecimento, calcinação e

clinkerização que é a parte mais importante do processo produtivo, seja em termos de emissões atmosféricas qualidade do produto ou custo. Na clinkerização temos a formação de minerais do clínquer à temperatura em torno de 1.400 a 1.500°C, que são transportados para estocagem intermediária após o resfriamento a ar para temperatura na faixa de 100 a 200°C. (CARPIO, 2005)

A produção do cimento propriamente dita dá-se a partir da moagem do clínquer, das adições e de uma pequena porcentagem de gesso no moinho de cimento. De acordo com Duda (1977), *apud* Carpio (2005), após o processo de moagem o produto deve estar dentro de determinados limites de granulometria, de modo a criar melhores condições para o processo de endurecimento. O processo finaliza com o transporte do cimento para silos de estocagem, de onde é extraído e ensacado. (Figura 27)

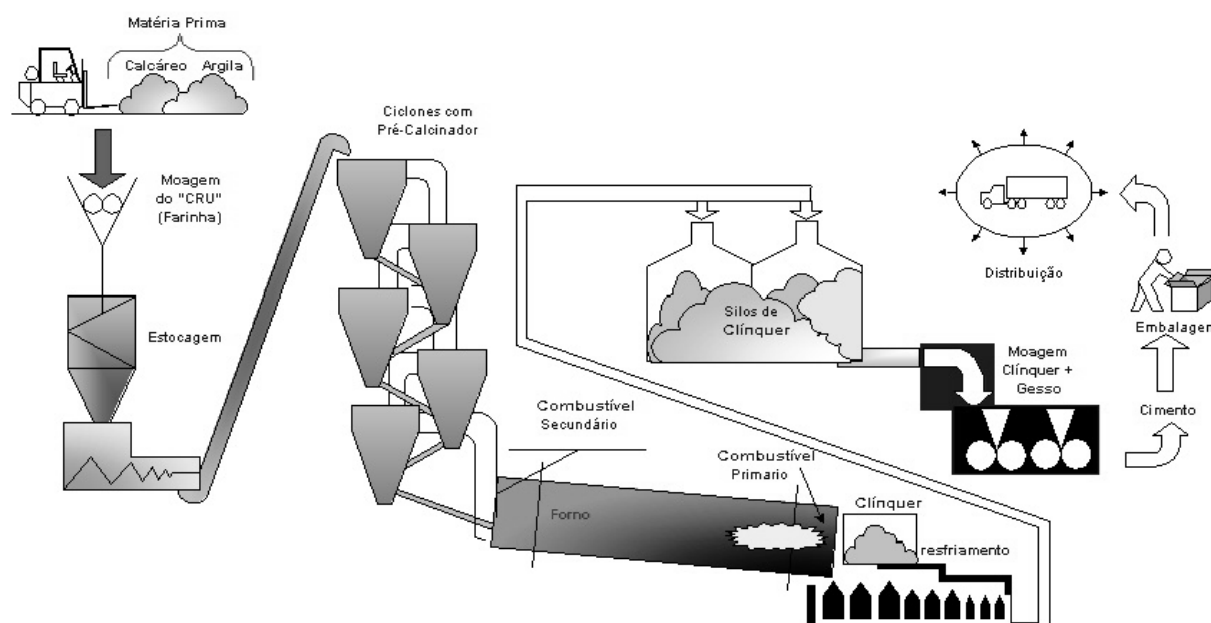


FIGURA 27 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO PRODUTIVO DO CIMENTO

Fonte: CARPIO (2005)

A indústria de cimento caracteriza-se pelo consumo intensivo de energia (Figura 28), seja na forma de calor, seja na forma de energia elétrica. Dados do World Business Council for Sustainable Development – WBCSD - (2002) indicam que para produzir uma tonelada de cimento, é necessário o equivalente a 60 a 130 kg de combustível e 110 kWh de energia elétrica. Esse perfil de consumo justifica a preocupação do segmento cimenteiro com a busca por insumos energéticos alternativos, visto a representatividade da energia no custo final do produto.

Evolução do Consumo Final do Setor de Cimento

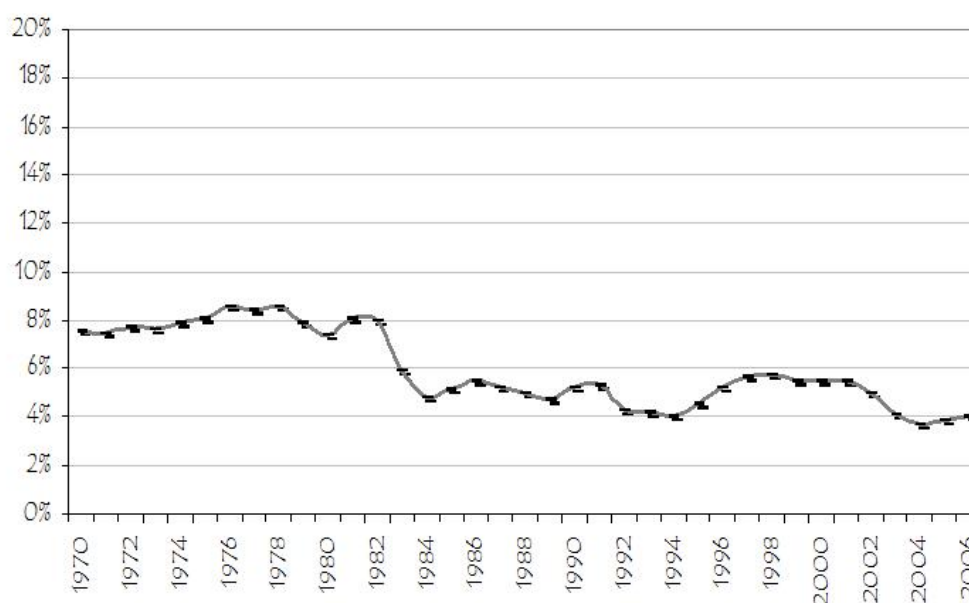


FIGURA 18 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO FINAL DO SEGMENTO DE CIMENTO RELATIVO AO TOTAL DO SETOR INDUSTRIAL

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do MME (2007)

A energia térmica necessária para a fabricação de cimento é derivada do combustível utilizado no processo de combustão no interior do forno. Segundo Santi (1997), a fabricação de 1 kg de cimento requer entre 3.260 a 3.770 kJ/kg de energia térmica. No caso da energia elétrica, os principais consumidores são os moinhos e os ventiladores de exaustão, tais como aqueles do forno e dos moinhos de cru e de clínquer. De acordo com Santi (1997), esse consumo representa 70% da energia elétrica da planta. (Tabela 3)

TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DA INDÚSTRIA DE CIMENTO BRASILEIRA

PARÂMETRO	DADOS
Processo	Via seca, 98% da produção
Consumo específico de energia térmica	3.260 a 3.770 kJ/kg de clínquer (780 a 900 kcal/kg)
Consumo específico de energia elétrica	80 a 150 kWh/t de cimento, 70% nos sistemas de moagem.
Sistemas de moagem	75% dos moinhos operando em circuito fechado

Fonte: SANTI (2004)

Uma das alternativas ao alto consumo de calor no processo da produção do cimento é o co-processamento dos resíduos industriais, denominados de combustíveis alternativos ou secundários. Temos assim, a possibilidade de obter a economia dos recursos energéticos com baixo custo e sem perda da qualidade do produto final. De acordo com Carpio (2005), no Brasil, as indústrias de cimento utilizam uma combinação de coque de petróleo com combustíveis alternativos, tais como pneus inservíveis, borras oleosas, lodos de estações de tratamento de efluentes, entre outros. (FIGURA 29)

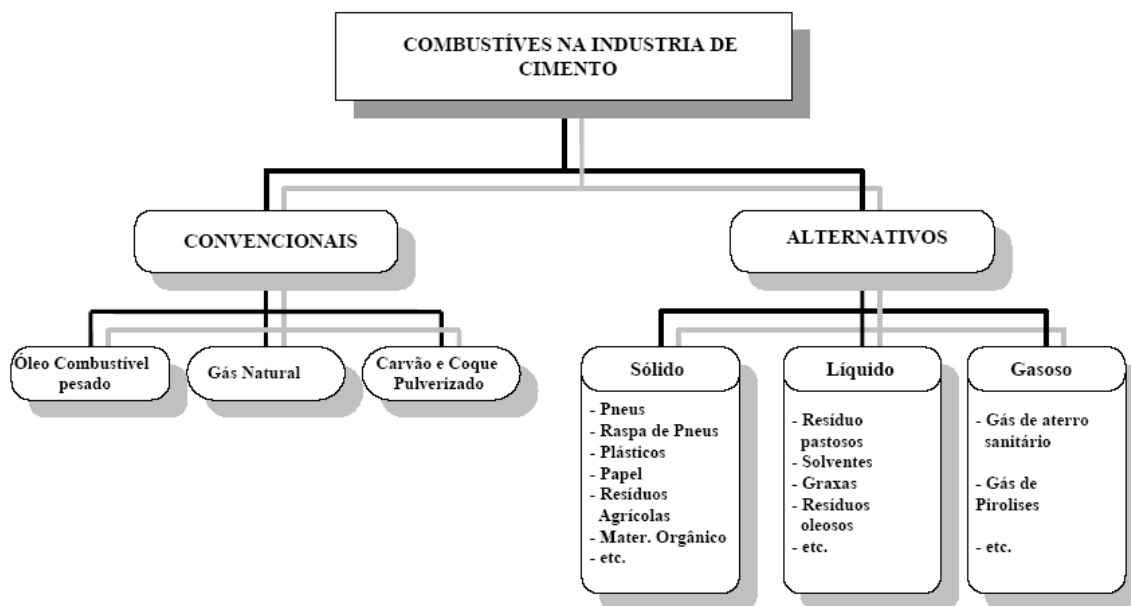


FIGURA 29 - COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DE CIMENTO.

Fonte: CARPIO (2005)

A análise do comportamento histórico do consumo de combustíveis no segmento cimenteiro nacional possibilita a constatação de uma matriz energética pouco diversificada, com alternância que predomina um único combustível. (Figura 30) A redução do consumo de carvão mineral e de carvão vegetal no período de 1987 a 2002 foi compensada pelo aumento no consumo de óleo combustível. A partir de 1998 verifica-se, entretanto, a substituição do óleo combustível pelo coque de petróleo, devido ao aumento do preço do óleo combustível. Assim, o coque de petróleo atualmente é o combustível mais viável economicamente, representando em 2006 mais de 65% da matriz energética. No caso do consumo de eletricidade, observa-se que o mesmo permanece praticamente constante: cerca de 10%. (Figura 31)

Evolução da Matriz Energética - Setor de Cimento

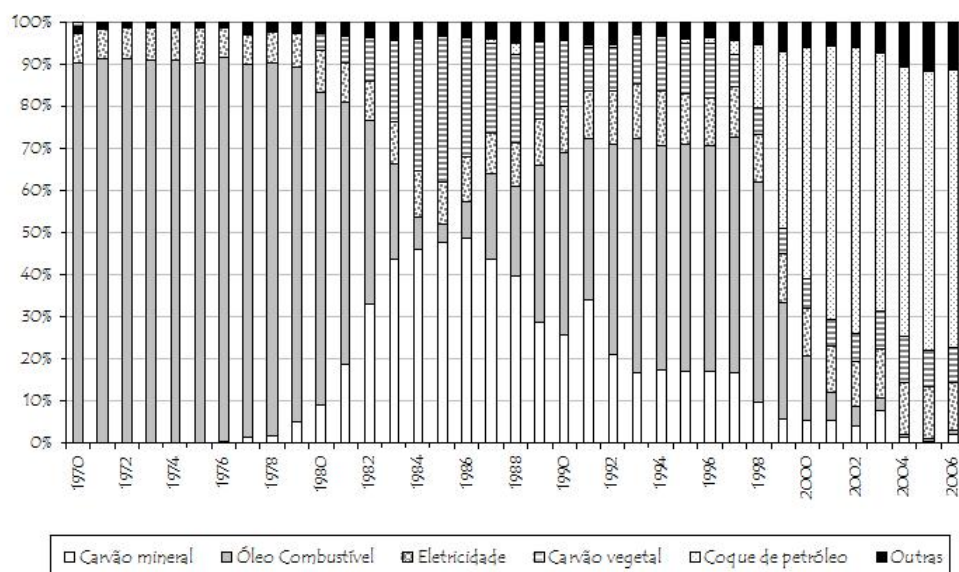


FIGURA 30 - EVOLUÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA DO SETOR DE CIMENTO

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do MME (2007).

Matriz Energética Setor de Cimento (2006)

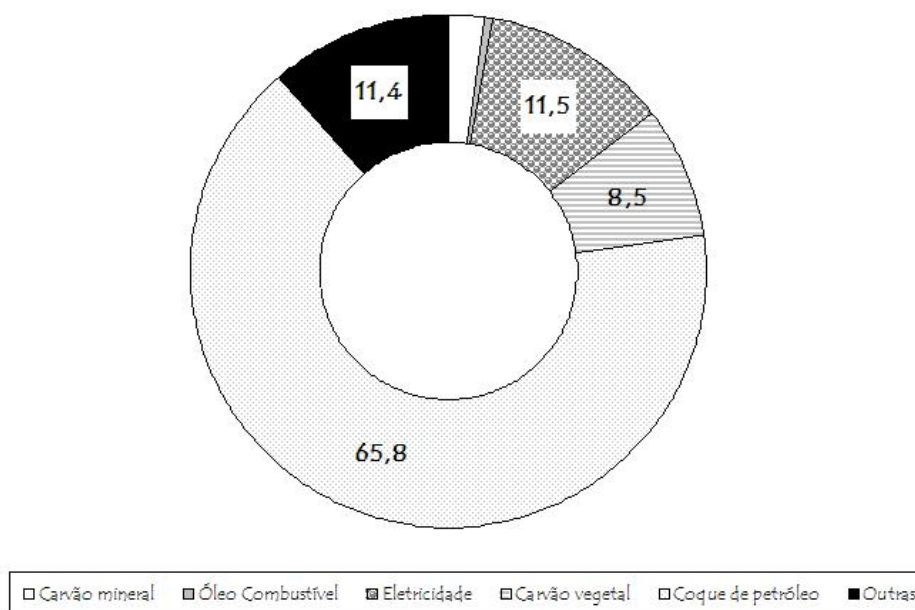


FIGURA 31 - MATRIZ ENERGÉTICA DO SETOR DE CIMENTO (2006)

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do MME (2007).

Sendo os processos de moagem da matéria-prima e do clínquer os grandes consumidores de energia elétrica, cabe destacar alguns fatores que afetam o consumo de energia durante a fase de moagem. Tokyay (1999), *apud* Carpio (2005), apresenta uma relação entre a superfície específica e o consumo energético: quanto maior a finura do cimento (granulometria), maior a superfície específica e, conseqüentemente, maior o consumo de energia. Anormalidades nos parâmetros da composição química do clínquer também podem dificultar o processo de moagem e, conseqüentemente, aumentar o consumo de eletricidade. (FIGURA 32)

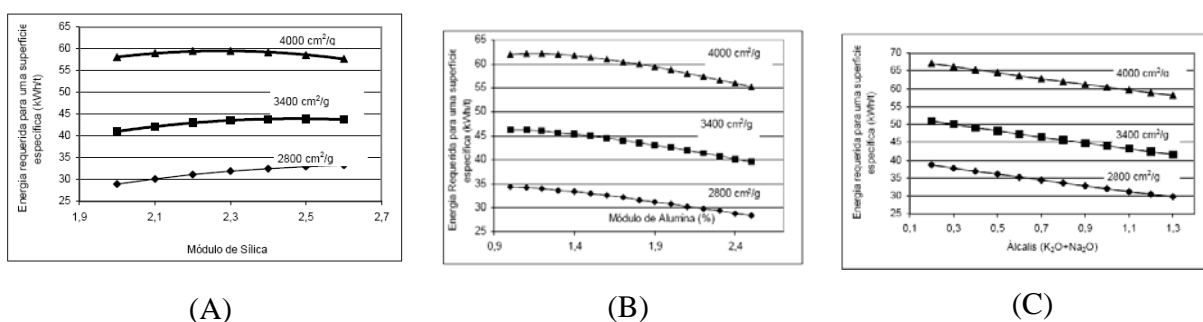


FIGURA 32 - RELAÇÃO ENTRE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA, SUPERFÍCIE ESPECÍFICA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO CLÍNQUER.

Em (A), módulo de sílica *versus* consumo de energia. Em (B), módulo de alumina *versus* consumo de energia. Em (C), álcalis *versus* consumo de energia.

Fonte: Tokyay (1999) *apud* Carpio (2005)

De acordo com Carpio (2005), atualmente a indústria de cimento busca soluções relacionadas aos combustíveis utilizados para a fabricação de clínquer, como, por exemplo, a eletricidade consumida no processo de produção, bem como o controle de emissões de poluentes. Essas soluções devem atender aos requisitos da qualidade do produto, às restrições ambientais e permitir alcançar um menor custo final de produção.

Diante dessa perspectiva, a indústria de cimento tem no co-processamento uma solução, uma vez que proporciona o aproveitamento térmico do poder calorífico de resíduos, substituindo, parcialmente, a queima de combustíveis fósseis não renováveis, além de ser uma forma de destinação dos resíduos industriais e urbanos. Dentre os resíduos que podem ser co-processados em fornos de clínquer, citam-se óleos, pigmentos, vernizes, catalisadores usados, produtos fotográficos, borras ácidas, resinas, colas, solvente misturado com tintas, pneus usados, produtos de borracha, terra ou areia suja com combustível, lodos de estação de tratamento e revestimento de cubas de alumínio, etc. De maneira distinta, não podem ser co-processados materiais patogênicos ou radioativos, pesticidas, explosivos, materiais com alto teor de cloro, lixo doméstico.

O co-processamento consiste basicamente na substituição de uma parcela do combustível tradicional por resíduos. Considerando-se que os fornos operam em altas temperaturas, os mesmos podem ser considerados ideais para a queima desses resíduos, pois permite a destruição térmica destes com alta eficiência: acima de 99.99% de destruição. (CARPIO, 2005)

Segundo Santi (2003), o co-processamento de resíduos nos fornos de clínquer em condições operacionais inadequadas pode resultar em emissão substancial de poluentes atmosféricos, poluentes estes constituídos de compostos originalmente presentes nos resíduos de produtos de combustão incompleta, ou de produtos sintetizados durante ou imediatamente após a combustão. Assim, a seleção das matérias-primas e dos combustíveis, bem como a maneira que o processo de produção de cimento é conduzido, são determinantes na quantidade de emissão de poluentes atmosféricos.

Carpio (2005) relaciona a fonte principal de emissão de CO₂ à etapa de fabricação do cimento, mais especificamente, à etapa da decomposição do carbonato de cálcio em óxido de cálcio e CO₂ na zona de calcinação. Acrescenta-se a isso ainda, os combustíveis utilizados para a fabricação do clínquer, bem como na mineração, transporte, distribuição etc.. (FIGURA 33)

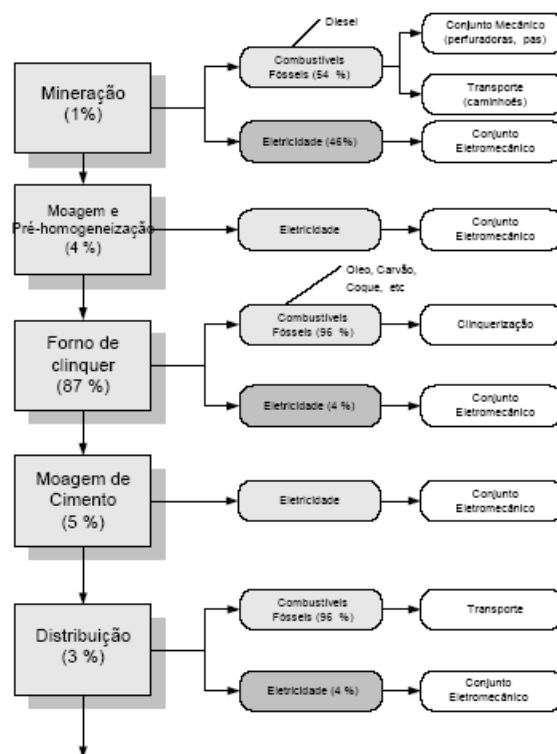


FIGURA 33 - EMISSÕES DE CO₂ EM FUNÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS NOS PROCESSOS PRODUTIVOS

Fonte: Carvalho Filho (2001) *apud* Carpio (2005)

As emissões de SO₂ correspondem aos resultados da reação química que se produz no forno para a obtenção de clínquer a partir do conteúdo de enxofre nas matérias-primas empregadas, bem como da queima do enxofre contido no combustível utilizado no forno de cimento. (Figura 8) Segundo Cembureau (1999), *apud* Carpio (2005), 95% do total de SO₂ emitido durante o processo de fabricação de clínquer podem ser absorvido pelo próprio processo. (TABELA 4)

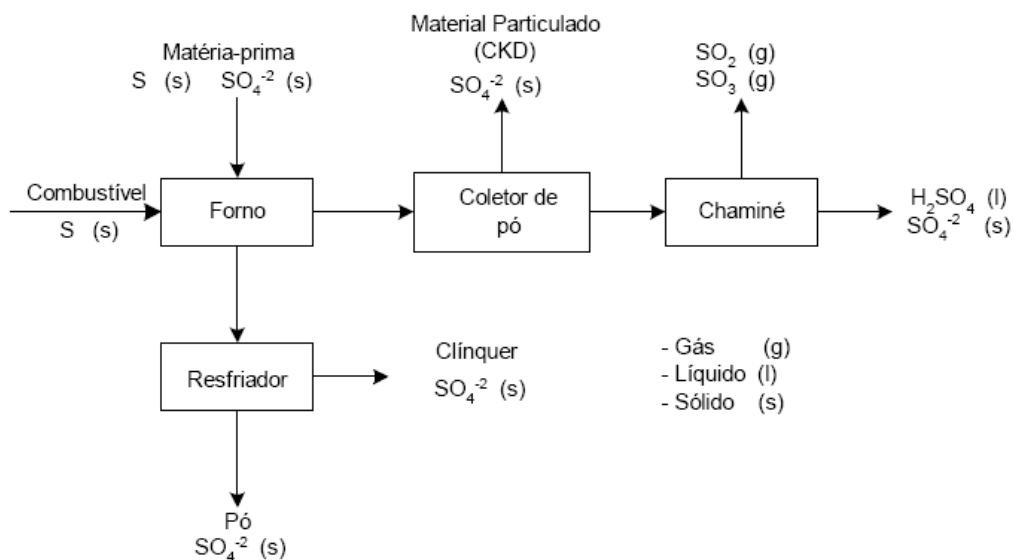


FIGURA 34 - MECANISMO DE FORMAÇÃO DO SO₂

Fonte: Greer (1989) *apud* Carpio (2005)

TABELA 4 - FORMAÇÃO E REMOÇÃO DE SO₂ NOS FORNOS DE CLÍNQUER.

Parte da planta	Formação de SO ₂	Absorção de SO ₂
Zona de moagem do cru	Não tem formação	CaCO ₃ + SO ₂ → CaSO ₃ + CO ₂
Zona de Preaquecimento	Sulfetos + O ₂ → óxidos + SO ₂ Comp.Org.(S) + O ₂ → SO ₂	CaCO ₃ + SO ₂ → CaSO ₃ + CO ₂
Zona de calcinação	Comb.(S) + O ₂ → SO ₂ CaSO ₄ + C → SO ₂ + CO	CaO + SO ₂ → CaSO ₃ CaSO ₃ + ½SO ₂ → CaSO ₄
Zona de queima	Comb.(S) + O ₂ → SO ₂	Na ₂ O + SO ₂ + ½O ₂ → Na ₂ SO ₄ K ₂ O + SO ₂ + ½O ₂ → K ₂ SO ₄ CaO + SO ₂ + ½O ₂ → CaSO ₄

Fonte: Seebach *et al* (2001) *apud* Carpio (2005)

As emissões de NO_x , expressas em termos de dióxido de nitrogênio (NO_2) e óxido de nitrogênio (NO), são provenientes do combustível utilizado na fabricação do clínquer. (FIGURA 35) Das emissões de NO_x nos sistemas de combustão, resultam dois processos relevantes: a formação de NO_x térmico e a formação de NO_x combustível. O primeiro é formado pela oxidação do nitrogênio atmosférico e depende diretamente da temperatura de chama. O último é formado pela oxidação dos compostos de nitrogênio, sendo diretamente dependente do conteúdo de nitrogênio no combustível.

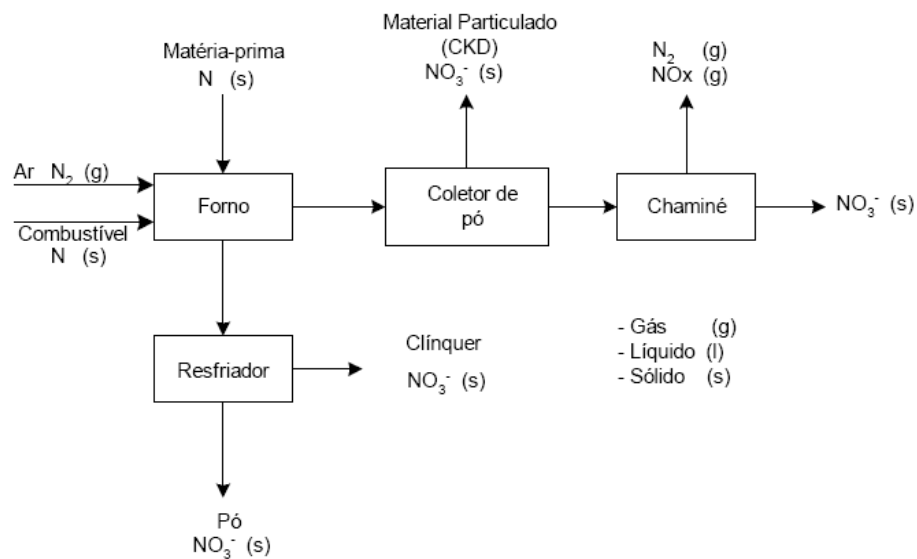


FIGURA 35 - MECANISMO DE FORMAÇÃO DO NO_x

Fonte: Greer (1989) *apud* Carpio (2005)

4.2.1 HOLCIM BRASIL

Fornecedor de materiais básicos e de soluções para a construção civil e ambiental, o Grupo *Holcim Brasil* atua nos segmentos de cimento, concreto, agregados e na prestação de serviços de co-processamento de resíduos. As unidades industriais estão localizadas nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo. Naquele estado as sedes industriais localizam-se nas cidades de Barroso e Pedro Leopoldo. No estado do Rio de Janeiro a sede localiza-se na cidade de Cantagalo e em Espírito Santo há uma moagem na cidade de Serra. Os terminais de distribuição de cimento estão localizados em Barbacena (MG), Ribeirão Preto e Santo André (SP), Rio de Janeiro (RJ), além dos depósitos que se localizam em Belford Roxo (RJ), Belo Horizonte, Juiz de Fora e Três Corações (MG).

O Grupo *Holcim* é membro ativo do *World Business Council for Sustainable Development* – WBCSD¹ – cujas missões são: ser um catalisador para a mudança em direção ao desenvolvimento sustentável e promover o papel da eco-eficiência, inovação e responsabilidade social corporativa. Dentre os objetivos do WBCSD destaca-se participar ativamente da iniciativa para uma indústria cimenteira sustentável. Para tanto, envolvem esforços de implementação de seis itens prioritários, sendo eles: proteção climática; uso responsável de combustíveis e matérias primas; segurança e saúde dos funcionários; redução das emissões atmosféricas; impactos locais sobre as comunidades; processos internos.

De acordo com *Holcim Brasil* (2005), estima-se que a indústria cimenteira mundial é responsável por cerca de 5% do total anual de CO₂ liberado pelas atividades humanas na atmosfera. Diante dessa perspectiva, o Grupo *Holcim*, juntamente com outros grupos internacionais produtores de cimento, firmou agenda de compromisso, perante o WBCSD, de redução em 20% da sua média específica de emissões de CO₂ (kgCO₂/t cimento) até o ano de 2010, tendo como referência os valores de 1999. Para o cumprimento dessa meta foram estabelecidos níveis de emissão por país, bem como antecipação do prazo final em dois anos (2008), para fins de margem de segurança. Assim, coube a *Holcim Brasil* a meta de reduzir as emissões em 32%, o que equivale a uma redução de cerca de 180 kgCO₂/t cimento.

¹ O WBCSD foi formado em 1995 através da fusão de dois institutos – o BCSD, com sede em Genebra, e o WICE, com sede em Paris. Hoje, com sede em Genebra, reúne 165 empresas internacionais dos 20 maiores setores industriais, em 30 países, unidos pelo compromisso de desenvolver estratégias que garantam o desenvolvimento sustentável.

A liberação de CO₂ durante a produção de clínquer apresenta origens na queima dos combustíveis fósseis utilizados para aquecimento do forno, bem como da descarbonatação do calcário. De acordo com Holcim Brasil (2005), para produzir uma tonelada de clínquer utiliza-se 1,6 tonelada de calcário.

Uma das alternativas adotadas pela Holcim para redução das emissões de CO₂ é a redução do fator clínquer, isto é, do percentual dessa matéria-prima na composição do cimento. A redução do uso do clínquer nos cimentos dá-se pela sua substituição por materiais alternativos que são originários dos processos produtivos de outras indústrias, como, por exemplo, a escória de siderúrgicas, e pela substituição de matérias-primas não renováveis: o calcário e a argila, por exemplo. (Holcim Brasil, 2005)

Na Figura 36, observa-se a evolução das emissões de CO₂, em que se constata uma tendência de alternância de ciclos de aumento e redução das mesmas. Após 2003, já se verificam os resultados da redução do fator de clínquer, incluindo o cumprimento da meta estabelecida para 2010.

Evolução das Emissões de CO₂ da Holcim Brasil

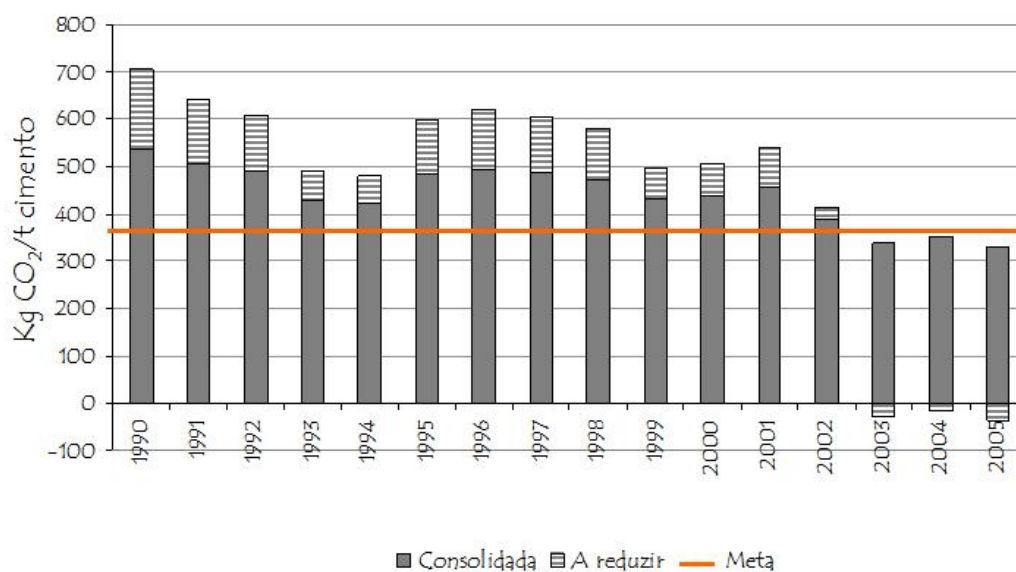


FIGURA 36 - EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO DA HOLCIM BRASIL

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da Holcim Brasil (2005)

As emissões de SO₂ das atividades industriais apresentam limites de tolerância definidos pelo órgão ambiental local. De uma maneira geral, verifica-se que essas emissões na Holcim Brasil apresentam concentrações inferiores àquelas preconizadas pela legislação vigente. (FIGURA 37) Há que destacar, entretanto, diferenças significativas entre os padrões ambientais mais restritivos estabelecidos para Cantagalo, em detrimento a Barroso e Pedro Leopoldo. Os relatórios de sustentabilidade ambiental da Holcim Brasil não apresentam dados relativos à emissão de NOx.

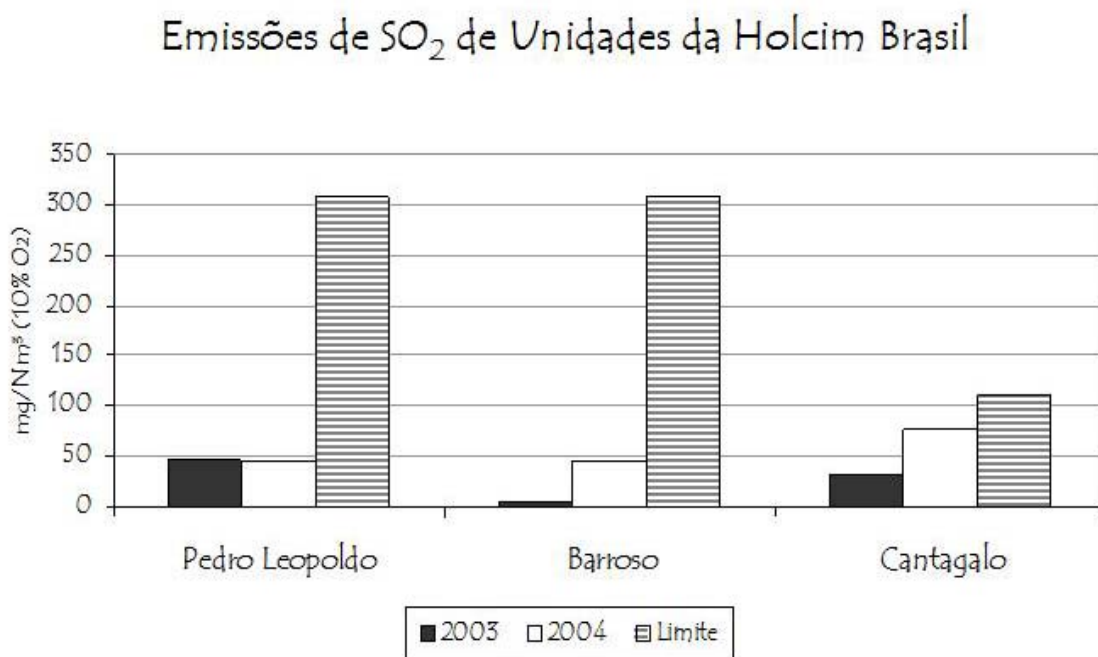


FIGURA 37 - EMISSÕES DE DIÓXIDO DE ENXOFRE DA HOLCIM BRASIL

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da Holcim Brasil (2005)

A energia é um dos principais insumos na produção de cimento, sendo a energia térmica a forma mais significativa nos processos produtivos, com destaque para o consumo dos fornos de clínquer: 97% (FIGURA 38). Toda a energia elétrica consumida nas unidades da Holcim Brasil, cerca de 310.000 MWh/ano, é fornecida pelas concessionárias locais e chega à empresa por meio de linhas de transmissão de 138 kV. (HOLCIM BRASIL, 2005)

Desde os anos 90, a Holcim Brasil realiza pesquisas de combustíveis alternativos para produção de cimento, para fins de controle do impacto ambiental causado pela utilização de recursos naturais não-renováveis, bem como para a redução do custo da energia térmica na composição dos custos de operação.

A Holcim, através da Resotec, vem substituindo, desde 1999, os combustíveis tradicionais – coque de petróleo, carvão mineral e óleos – por combustíveis alternativos renováveis, mais especificamente pela biomassa – moinha de carvão vegetal e resíduos da indústria siderúrgica – bem como pela energia gerada pelo co-processamento de resíduos industriais nos fornos de clínquer.

Consumo Direto Energia Térmica na Holcim Brasil (2004)

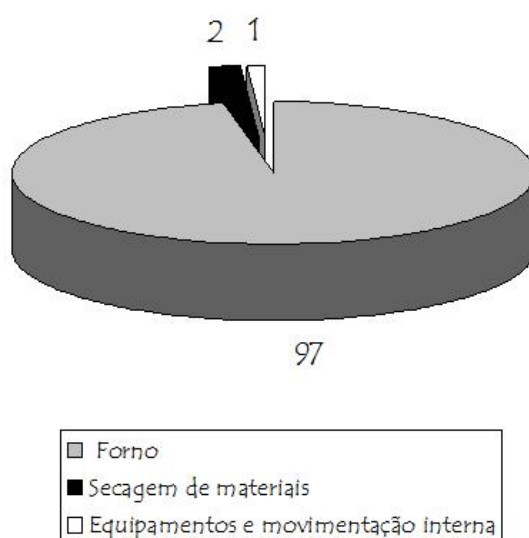


FIGURA 38 - CONSUMO DIRETO DE ENERGIA TÉRMICA NA HOLCIM BRASIL

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da Holcim Brasil (2005)

A comparação das matrizes energéticas dos anos de 2001 e 2004 da Holcim Brasil comprova essa tendência de substituição dos combustíveis tradicionais por alternativos, com destaque para o co-processamento de resíduos que em 2004 já apresentava uma participação de 85% na matriz energética total das unidades de Barroso, Cantagalo e Pedro Leopoldo (FIGURA 39). É importante, assim, o papel do co-processamento na segurança energética das atividades industriais da Holcim Brasil.

O co-processamento aproveita-se das excelentes condições do forno de clínquer – altas temperaturas e eficiente sistema de controle ambiental, incluindo potentes filtros e monitoramento on line – para dar uma destinação final a diversos tipos de resíduos industriais. Nesse processo, o conteúdo mineral do resíduo é utilizado como matéria-prima na produção do clínquer e a parcela orgânica substitui parte do combustível necessário para o funcionamento dos fornos. (FIGURA 40)

A Holcim Brasil (2005) considera a prestação de serviços de destinação de resíduos, por meio de co-processamento em fornos de clínquer, uma alternativa para a sociedade destinar vários materiais descartados por diferentes indústrias, com aproveitamento secundário do poder calorífico e das matérias-primas neles contidos, poupando, assim, os recursos naturais não renováveis.

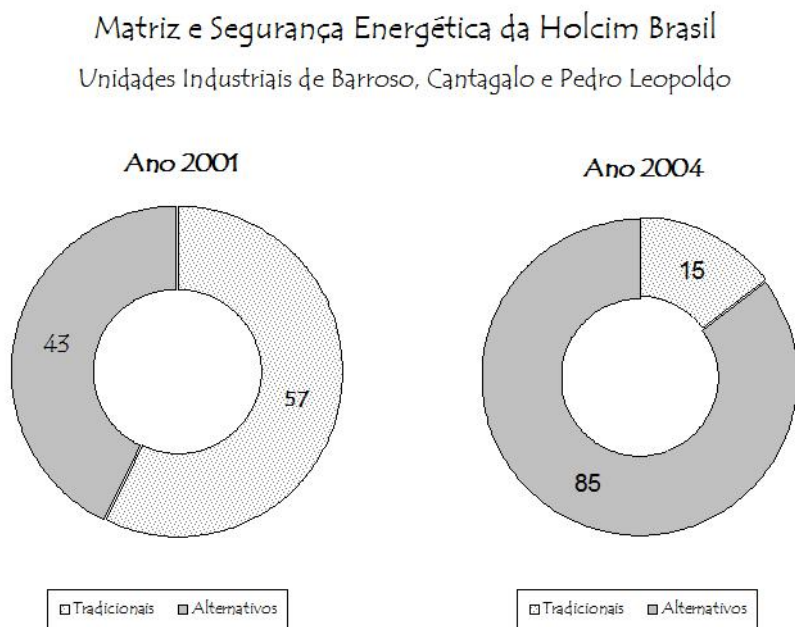


FIGURA 39 - MATRIZ E SEGURANÇA ENERGÉTICA DA HOLCIM BRASIL

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da Holcim Brasil (2005)

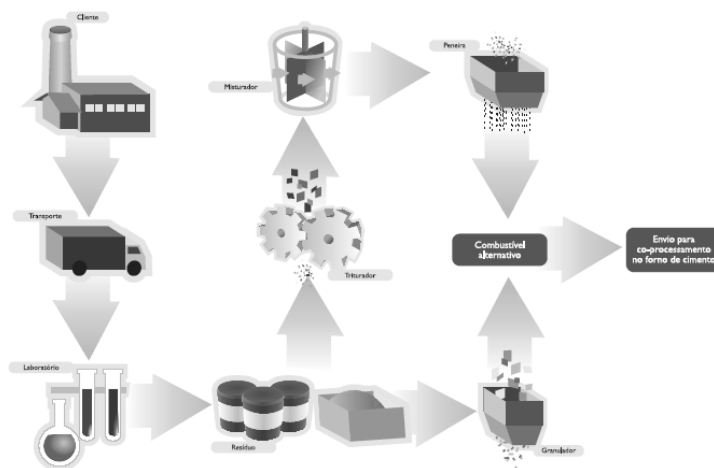


FIGURA 40 - PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS PARA COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

Fonte: Holcim Brasil (2005).

4.3 Indústria de Papel e Celulose

A produção de papel e celulose é uma atividade bastante complexa que envolve vários processos com diversos estágios e produtos (PIOTTO, 2003). Assim, antes do diagnóstico deste segmento em termos de sustentabilidade energética, segue uma descrição sumária da produção de papel e celulose, em conformidade com Velazquez (2000). (FIGURA 41)

A matéria-prima para o processo de produção de papel e celulose é a madeira que é transportada em caminhões das florestas para as unidades industriais propriamente ditas. Nessas, temos o descarregamento das toras de madeira nas mesas transportadoras, que as enviam para os tambores descascadores a fim de que sejam retiradas e separadas das cascas. As toras descascadas são direcionadas para picadores, onde são reduzidas a pequenos fragmentos, denominados cavacos. Esses, antes de entrar nos digestores, passam por peneiras vibratórias, para fins de separação de lascas e finos.

O processo continua com o cozimento da madeira, também conhecido como processo Kraft ou sulfato, que consiste no tratamento dos cavacos com lixívia branca. Esta etapa é finalizada quando se obtém a dissolução em maior grau do material não-celulósico, ou seja, a lignina e extrativos, sem prejuízos ao rendimento da celulose. A separação dos materiais não cozidos é realizada na etapa seguinte, denominada depuração, enquanto na lavagem, dá-se à separação da celulose dos materiais orgânicos dissolvidos durante o cozimento, juntamente com os inorgânicos. É importante ressaltar que a etapa da lavagem envolve vários estágios, sendo a lixívia resultante do primeiro estágio, denominada lixívia preta ou licor negro, enviada a unidade de evaporação.

O tratamento da celulose usando o oxigênio em meio alcalino, para fins de pré-branqueamento, dá continuidade ao processo. A lixívia deslocada do primeiro estágio é enviada ao chuveiro do último estágio de lavagem da primeira mesa plana. A lignina residual dissolvida é deslocada no processo de lavagem na segunda mesa plana, utilizando água quente e limpa no último estágio. A celulose pré-branqueada é lavada e estocada, de onde pode ser enviada ao branqueamento para máquinas de papel ou unidades de secagem.

No processo de tratamento da celulose, a recuperação de produtos químicos apresenta importância por motivos tanto econômicos quanto ambientais. Essa recuperação é realizada em três estágios: evaporação, caldeira de recuperação e caustificação.

A primeira etapa é marcada pela evaporação da água, para fins de concentração de sólidos constituídos de álcalis e lignina, para possibilitar a queima na caldeira de recuperação, utilizando para isto a lixívia preta concentrada como combustível.

A caldeira de recuperação apresenta como principais funções recuperar produtos químicos e reaproveitar materiais para a produção de energia. Em relação à primeira, cita-se a transformação de sais de sódio da lixívia preta em carbonato de sódio e a transformação de sulfato em sulfeto de sódio.

Já a última envolve a produção de vapor pela combustão do material orgânico solubilizado durante o cozimento.

Os produtos químicos obtidos neste segundo estágio são dissolvidos em lixívia branca fraca, formando a lixívia verde. Na etapa de caustificação, temos a efetivação da conversão da lixívia verde em lixívia branca reutilizável no processo de polpamento, completando o ciclo de álcalis.

Após a remoção da lignina, ainda remanescente na pasta química, são aplicados produtos químicos que propiciam seu branqueamento através da modificação química das substâncias coloridas. Permite-se, assim, o bombeamento da pasta celulósica pronta para as máquinas de papel e/ou extração de celulose.

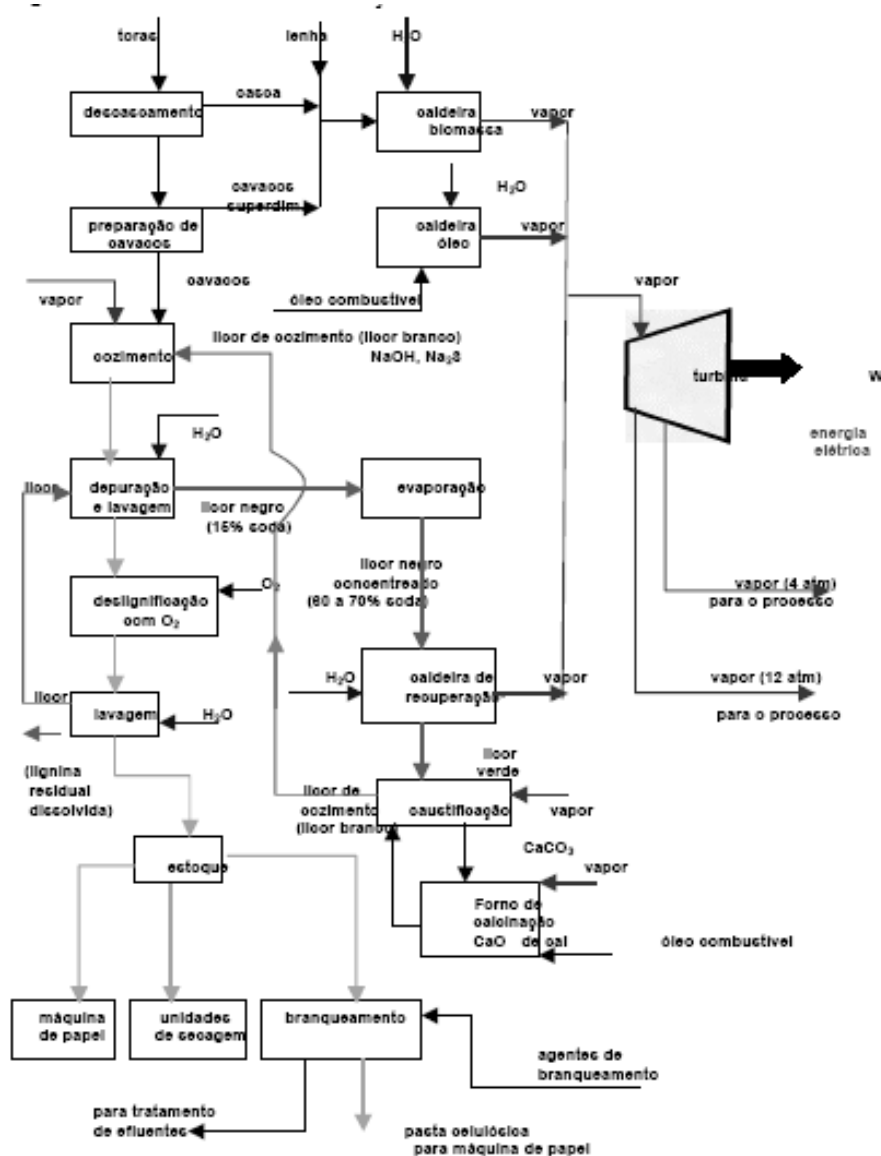


FIGURA 41 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO PRODUTIVO DA CELULOSE

Fonte: Velazquez (2000)

O segmento de papel e celulose está entre o mais eletro-intensivos do setor industrial. O consumo final desse segmento em relação ao setor industrial apresenta-se em crescimento desde 1970, tendendo a estabilidade a partir de 2000, em cerca de 10%. (FIGURA 42)

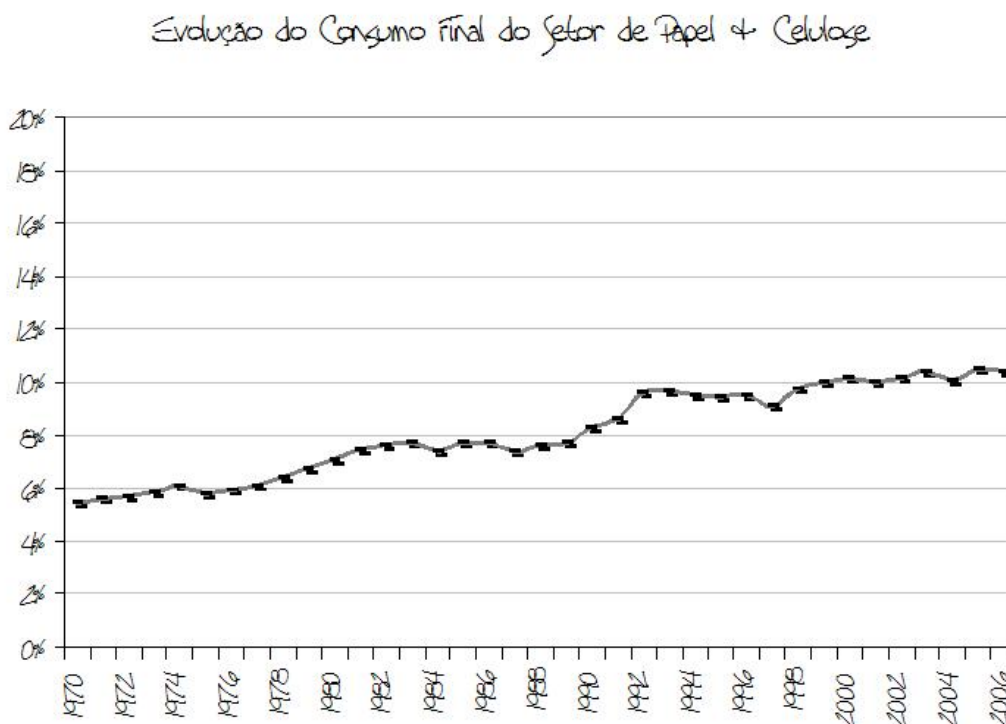


FIGURA 42 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO FINAL DO SETOR DE PAPEL E CELULOSE RELATIVA AO TOTAL DO SEGMENTO INDUSTRIAL

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do BEN (2007)

O segmento apresenta-se ainda, dentro do setor industrial, como um dos maiores consumidores de biomassa. A lixívia representa 45% de sua matriz energética, seguida de 16% entre cascas, cavacos e lenha. (FIGURA 43)

Historicamente, observa-se uma tendência de redução do consumo de óleo combustível e do aumento da participação da lixívia no setor de papel e celulose. (FIGURA 44) Isso pode ser justificado pelas vantagens na reciclagem da lixívia neste processo produtivo. De acordo com Velazquez (2000), essas vantagens relacionam-se ao fato da lixívia ser um resíduo inevitável do processo produtivo, além de conter todos os produtos químicos utilizados no processo kraft de fabricação de celulose. Acrescenta-se a isso ainda, o caráter altamente tóxico e poluente da lixívia, que, se não fosse utilizada como combustível na caldeira de recuperação, deveria ser descartada, o que implicaria elevados impactos ambientais.

Matriz Energética – Setor Papel & Celulose (2006)

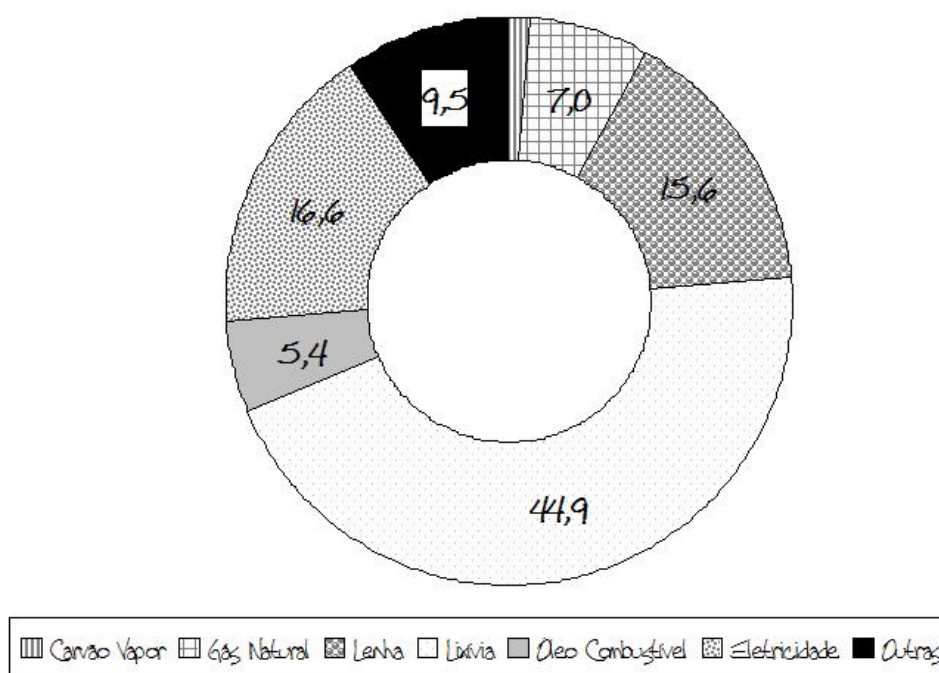


FIGURA 43 - MATRIZ ENERGÉTICA DO SETOR DE PAPEL E CELULOSE (2006)

Fonte: Elaboração própria, a partir do BEN (2007).

Evolução da Matriz Energética – Setor Papel & Celulose

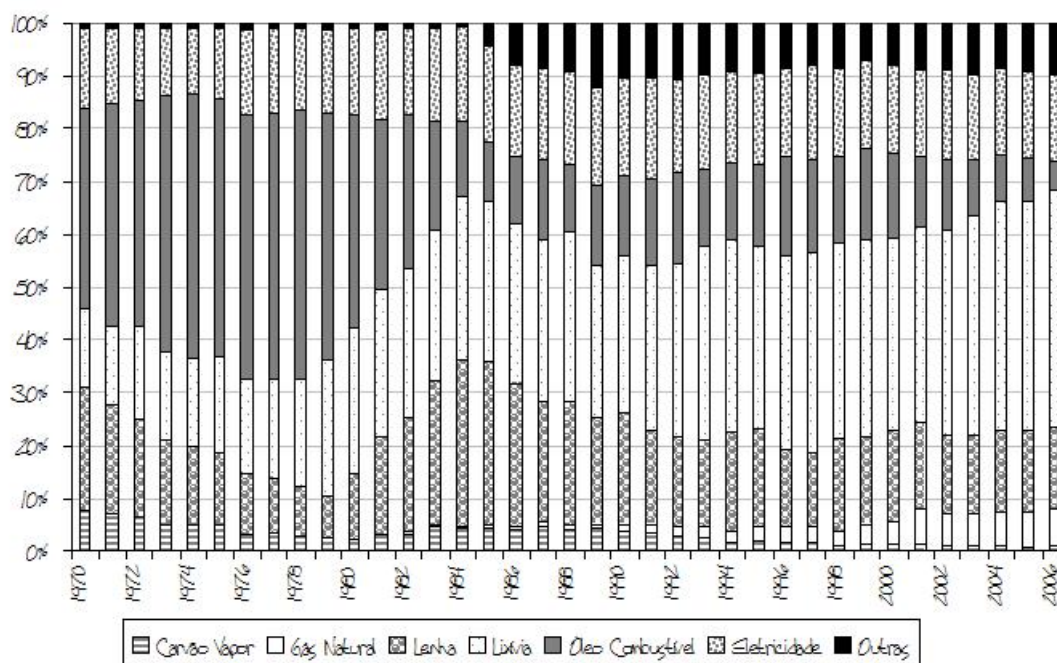


FIGURA 44 - EVOLUÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA DO SETOR DE PAPEL E CELULOSE

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do BEN (2007).

De acordo com Velazquez (2000), a análise da indústria de papel e celulose mostra que a forma mais efetiva de reduzir as emissões e o consumo de recursos naturais, bem como melhorar o desempenho econômico, é a implementação das melhores tecnologias de processo e controle de emissões remanescentes.

Existem muitas vantagens na substituição de combustíveis fósseis pela biomassa, especialmente pela redução das emissões de gases de efeito estufa e outros poluentes. Destaca-se, nesse sentido, a ausência de enxofre na biomassa, não propiciando, assim, a emissão de SO₂ na combustão. As emissões de CO₂ pela queima da biomassa podem ser consideradas praticamente nulas, pois o CO₂ liberado na reação química é reabsorvido no próximo ciclo de vida de uma planta (VELAZQUEZ, 2000).

O segmento de papel e celulose tem grande potencial para se tornar auto-suficiente em termo energético, produzindo todo o vapor e eletricidade necessários ao processo. De acordo com a Bracelpa (1998), *apud* Velazquez (2000), as indústrias de celulose geram grande parte da eletricidade consumida (80-85%), bem como as fabricantes de papel e celulose (50-60%), a partir da lixívia produzida no próprio processo e da biomassa em geral. No entanto, as indústrias de papel produzem apenas 10% da eletricidade necessária no processo, sendo o restante comprado das concessionárias, pelo fato de não terem disponibilidade de combustível nas próprias empresas, já que os materiais passíveis de gerar eletricidade estão concentrados na etapa anterior do processo: na etapa da produção de celulose.

Tendo em vista o perfil eletro-intensivo do segmento de papel e celulose, o processo de cogeração de energia destaca-se dentro do processo produtivo, com possibilidades de benefícios para os setores envolvidos, incluindo a sociedade como um todo. (VELAZQUEZ, 2000)

De acordo com Strapasson (2004), o setor de papel e celulose possui elevado consumo de energia nas atividades de secagem, por meio do uso final em calor de processo. No processo de recuperação da cal em fornos tipo câmara, destaca-se o aquecimento direto usando combustíveis líquidos e gasosos, tais como, por exemplo, licor negro, óleo combustível e gás natural. É importante mencionar que a eletricidade é pouco utilizada em processos de aquecimento por meio de resistência elétrica e de radiação infravermelha. No caso do gás natural, é importante mencionar seu potencial como substituto do óleo combustível e da lenha, com destaque para as seguintes tecnologias: os diversos tipos de caldeiras e as tecnologias de combustão submersa, os trocadores de calor submersos compactos, os tubos submersos compactos, os processos de secagem direta e os sistemas de cogeração.

4.3.1. ARACRUZ CELULOSE

A Aracruz Celulose é uma empresa brasileira e líder mundial na produção de celulose branqueada de eucalipto. Ela responde por cerca de 30% da oferta global do produto destinado a fabricação de papéis de imprimir e escrever, papéis sanitários e papéis especiais de alto valor agregado.

As práticas de sustentabilidade corporativa da Aracruz Celulose são reconhecidas em nível nacional e internacional. A Aracruz Celulose inclui-se entre as 28 empresas que compõem o Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE) da Bovespa, além de ser uma das três empresas brasileiras que integram o Índice Dow Jones de Sustentabilidade 2006 (DJSI World).

Dentre as unidades industriais da Aracruz Celulose, destacam-se a Barra do Riacho e Guaíba. (FIGURA 45) A primeira, localizada no Espírito Santo, é a maior fábrica de celulose de eucalipto do mundo, com capacidade total de 2,1 milhões de toneladas anuais do produto. A última, localizada no Rio Grande do Sul, apresenta capacidade de produzir 430 mil toneladas anuais de celulose, sendo parte deste volume destinado à produção de cerca de 50 mil toneladas anuais de papel (ARACRUZ CELULOSE, 2006).

Unidades Industriais da Aracruz Celulose no Brasil

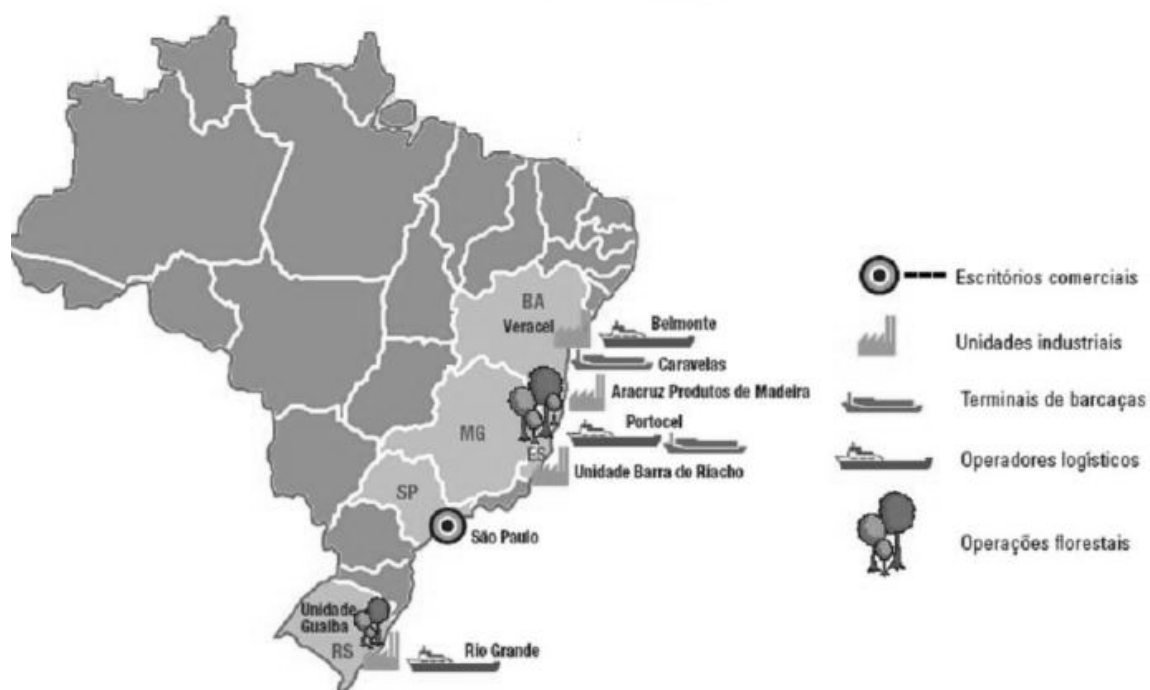


FIGURA 45 - UNIDADES INDUSTRIAIS DA ARACRUZ CELULOSE NO BRASIL

Fonte: ARACRUZ CELULOSE, 2006.

A Unidade Barra do Riacho apresenta matriz energética com participação expressiva da lixívia: cerca de 85%. As demais fontes de energia presentes nessa unidade são biomassa (7,4%), óleo combustível (6,4%), hidrogênio, gases não condensáveis e metano (2%). (FIGURA 46) Ou seja, a matriz energética dessa unidade é caracterizada pela predominância de fontes renováveis que é superior a 90%. É importante destacar ainda, que a Unidade Barra do Riacho é quase auto-suficiente em termos energéticos, com a aquisição de apenas 1% da energia necessária na produção de celulose. (FIGURA 47)

A Unidade Guaíba por enquanto apresenta uma participação menos expressiva da lixívia em sua matriz energética, cerca de 50%. Nessa unidade ainda verifica-se uma participação mais intensa de fontes não renováveis, mais especificamente do carvão (40%) e óleo combustível (8%). (FIGURA 46) A unidade apresenta também um potencial significativo - cerca de 25% - de autogeração de energia a ser explorado. (FIGURA 47)

Matriz Energética da Aracruz Celulose (2006)

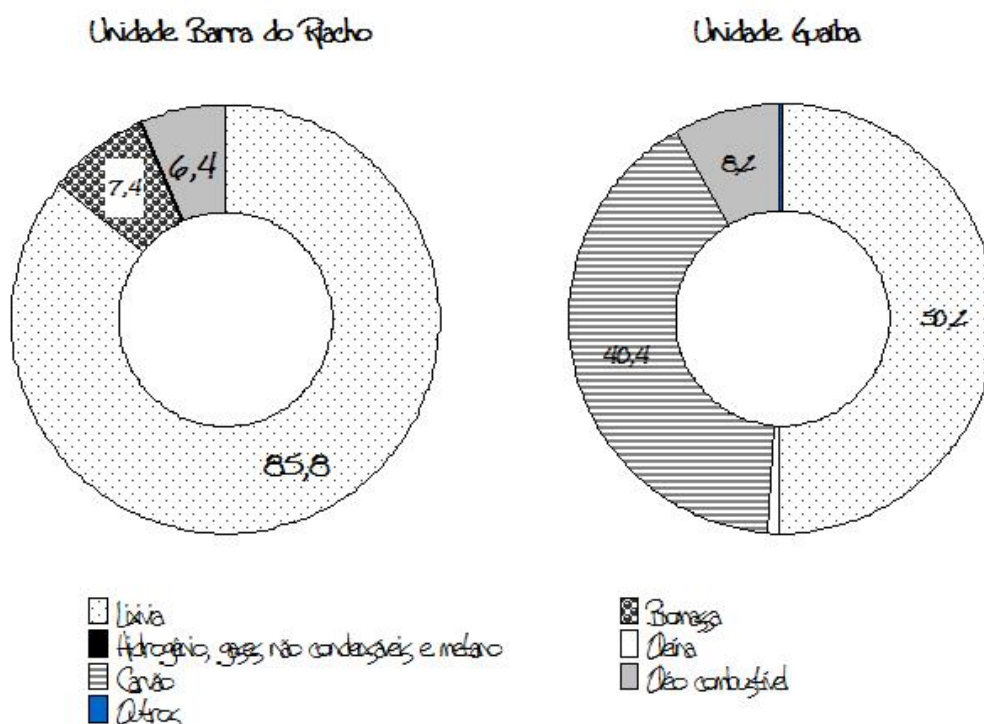


FIGURA 46 - MATRIZ ENERGÉTICA DA ARACRUZ CELULOSE EM 2006

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da Aracruz Celulose (2006).

Segurança Energética na Aracruz Celulose (2006)

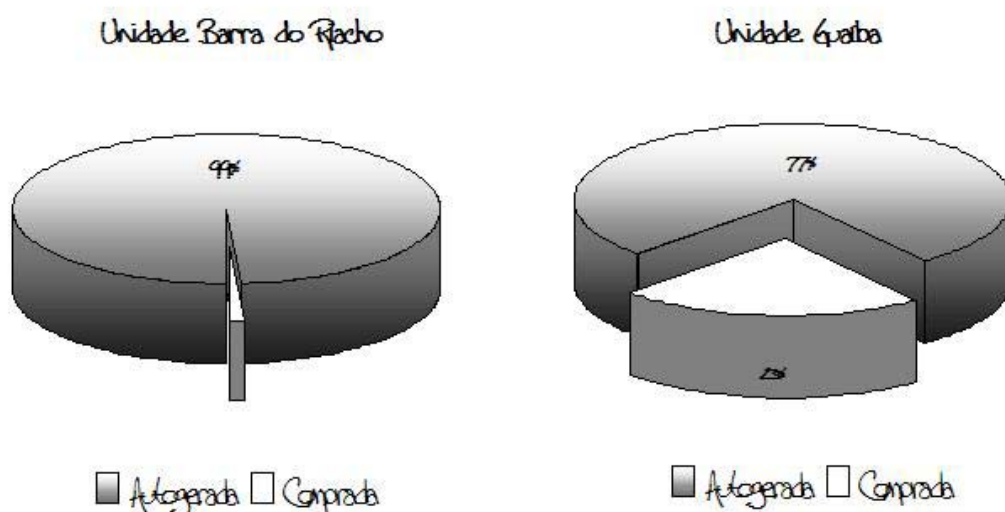


FIGURA 47 - SEGURANÇA ENERGÉTICA NA ARACRUZ CELULOSE EM 2006

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da Aracruz Celulose (2006).

O modelo de inventário de GEE e seqüestro de carbono desenvolvido para a empresa Aracruz Celulose permitiu a identificação de quatro áreas de oportunidades de lucro, além de uma melhor compreensão do balanço de carbono da empresa.

Detentora de 405 mil hectares de terra distribuídas em quatro estados do país, a Aracruz Celulose identificou a expansão florestal em áreas desmatadas como oportunidade para obtenção de créditos de carbono. Em 2004 apenas 10% desta área era destinada a instalações, sendo cerca de 90% das terras ocupadas por florestas, seja de plantação de eucaliptos para produção (60%), seja de reservas nativas (30%).

Dentre as iniciativas para redução das emissões de GEE e aumento do seqüestro de carbono na empresa Aracruz Celulose, destaca-se ainda as alterações no sistema de transporte. Desde 2002 a empresa adota um percurso de cerca de 300 Km de transporte marítimo com volume de madeira de 1.700.000 m³ por ano, em detrimento ao transporte rodoviário. Outra oportunidade identificada para geração de lucro, refere-se à utilização de transporte ferroviário de aproximadamente 4 Km do porto para o pátio de madeira das unidades industriais.

A empresa destaca ainda que dá prioridade à utilização de recursos renováveis e de energia autogerada a partir da biomassa e licor negro, como estratégia de redução das emissões de GEE, bem como de eficiência energética.

A avaliação dos resultados do inventário dos gases de efeito estufa (GEE), proveniente da operação da empresa Aracruz Celulose em 2006, permite-nos a constatação da redução de suas

emissões em cerca de 10% em relação ao ano de 2003. Observa-se ainda uma tendência de manutenção da proporcionalidade das emissões de GEE nas unidades da referida empresa, com uma participação de cerca de 50% de cada unidade em relação às emissões totais. (FIGURA 48)

Controle de Impacto Ambiental na Aracruz Celulose

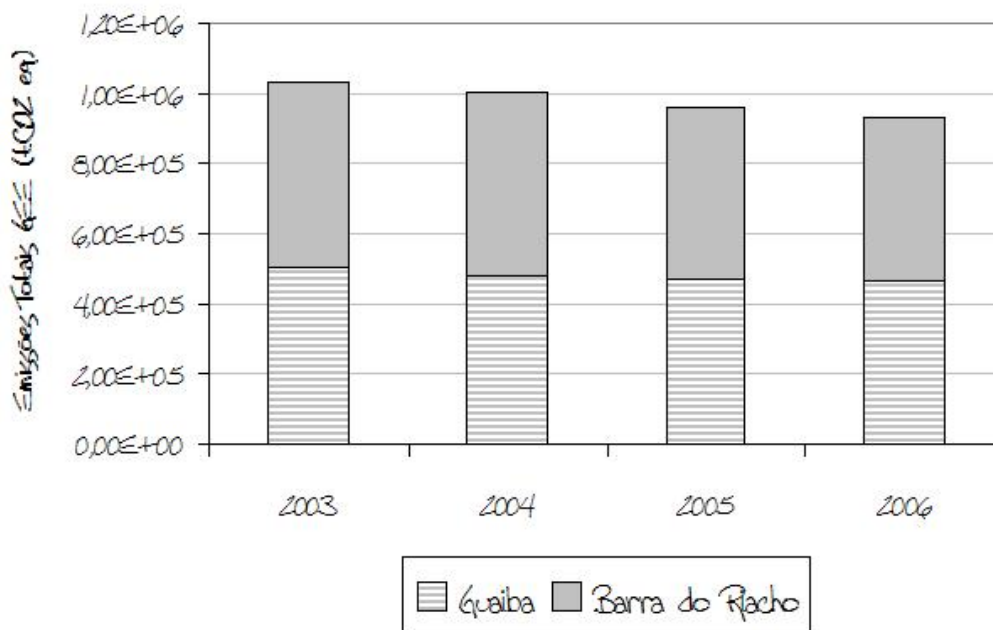


FIGURA 48 - EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) DA ARACRUZ CELULOSE

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da Aracruz Celulose (2006).

A Aracruz Celulose tem considerado como práticas de eficiência energética apenas a utilização de recursos renováveis e de energia autogerada. Não foram reportadas informações nos relatórios anuais de sustentabilidade ambiental da empresa acerca da energia economizada devido a melhorias em conservação e eficiência energética de equipamentos e processos.

4.4 Indústria Petroquímica

A indústria petroquímica é caracterizada por enormes unidades produtivas, responsáveis pela grande disponibilidade de produtos existentes no mundo contemporâneo, com destaques para plásticos, tecidos e fibras sintéticas, bem como aqueles denominados de química fina que é responsável por produtos desde medicamentos até fertilizantes.

A indústria petroquímica pode ser definida por processamento de matérias-primas em produtos com valor comercial agregado, envolvendo processos unitários, ou seja, conversões químicas, bem como operações unitárias ou físicas (FIGURA 49). Assim, este segmento industrial caracteriza-se fundamentalmente pela utilização de frações resultantes do refino de petróleo, principalmente nafta ou de gás natural, que por suas transformações químicas geram, respectivamente, produtos básicos (olefinas e aromáticos), intermediários (butiraldeído, estireno, cloreto de vinila etc) ou intermediários para os setores da química fina (clorobenzeno, ácido dicloroacético etc) e finais (polímeros para fibras, plásticos elastômeros etc). Para tanto, o setor petroquímico é estruturado em três categorias, denominadas gerações, em que cada uma delas é responsável por uma determinada fase de transformação. (GEROSA, 2007)



FIGURA 49 - PROCESSAMENTO INDUSTRIAL QUÍMICO

Fonte: Elaboração própria.

De acordo com Gerosa (2007), as indústrias de primeira geração utilizam-se como insumos os hidrocarbonetos leves, tais como nafta e gás natural, para realização de processos de craqueamento, pirólise - transformação por aquecimento de uma mistura ou de um composto orgânico em outras substâncias - e reforma catalítica. O craqueamento de matérias-primas permite a obtenção de olefinas (eteno, propeno e butadieno), aromáticos (benzeno, tolueno e xileno) e, secundariamente, combustíveis como a gasolina de pirólise.

Já as indústrias de segunda geração são responsáveis pelo processamento dos insumos petroquímicos das indústrias de primeira geração, obtendo-se produtos intermediários, tais como estireno e monômero do cloreto de vinila, bem como produtos finais, como, por exemplo, o polietileno, e o polipropileno, que serão fornecidos diretamente às empresas de terceira geração.

Finalizando, as indústrias de terceira geração são responsáveis pelas transformações dos produtos petroquímicos em produtos finais para o consumidor, tais como embalagens plásticas, utilidades domésticas, brinquedos, calçados, solados, sandálias, pneus e autopeças. (FIGURA 50)

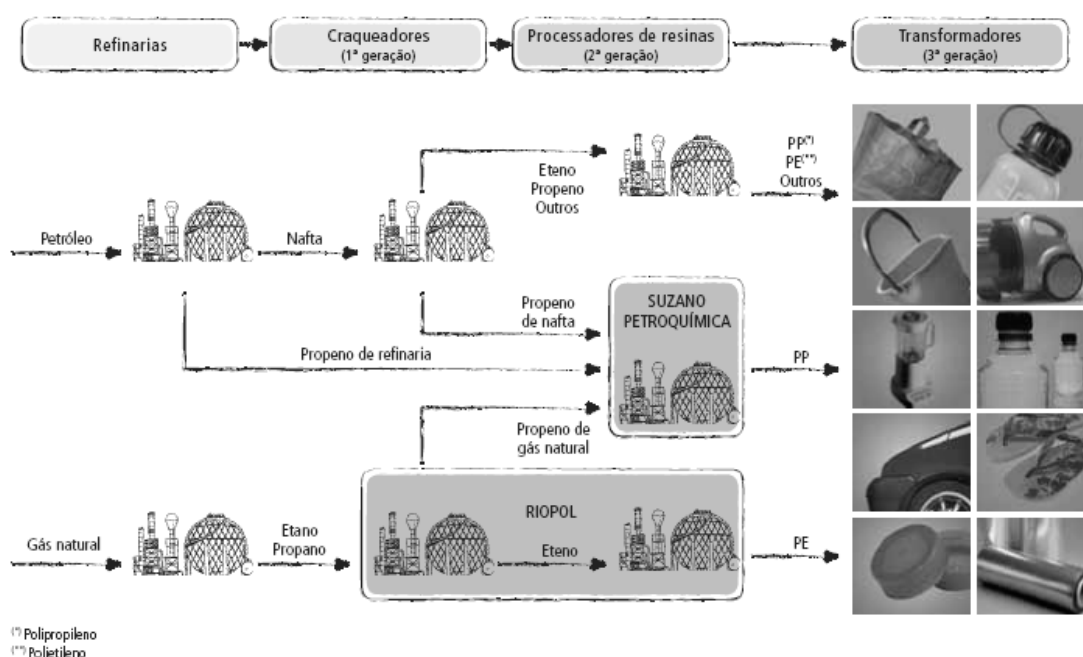


FIGURA 50 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO PRODUTIVO DA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA

Fonte: Suzano Petroquímica (2007)

A indústria petroquímica é considerada um ramo do setor químico que se caracteriza pelo consumo intensivo de energia, representando cerca de 10% do total de energia consumida pelo setor industrial, desde 1980 (FIGURA 51). Esse segmento apresenta-se como um dos maiores consumidores de insumos energéticos derivados do petróleo e de energia elétrica, o que representa desde a década de 90 aproximadamente 25% da matriz do setor.

A partir da análise da evolução da matriz energética desse segmento, observa-se ainda que, até a década de 1980, o óleo combustível era um dos principais insumos energéticos. Entretanto, ao longo das últimas décadas, nota-se a tendência de substituição do óleo combustível por outros insumos energéticos, com destaque para o gás natural e outras fontes secundárias de petróleo (FIGURA 52). Assim, verifica-se uma matriz energética bastante dependente de fontes não renováveis: superior a 70% em 2006 (FIGURA 53).

Evolução do Consumo Final do Setor Químico

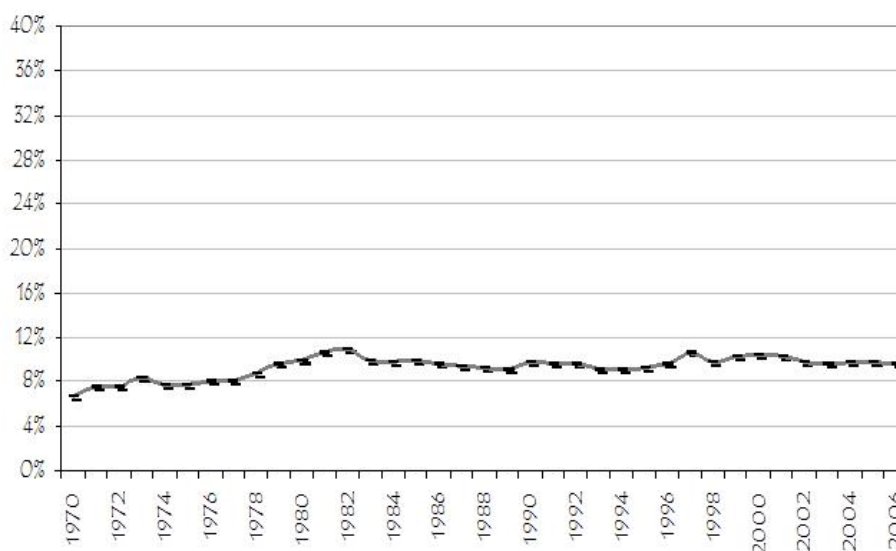


FIGURA 51 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO FINAL DE ENERGIA DO SEGMENTO QUÍMICO RELATIVO AO TOTAL DO SETOR INDUSTRIAL

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do MME (2007)

Evolução da Matriz Energética – Setor Químico

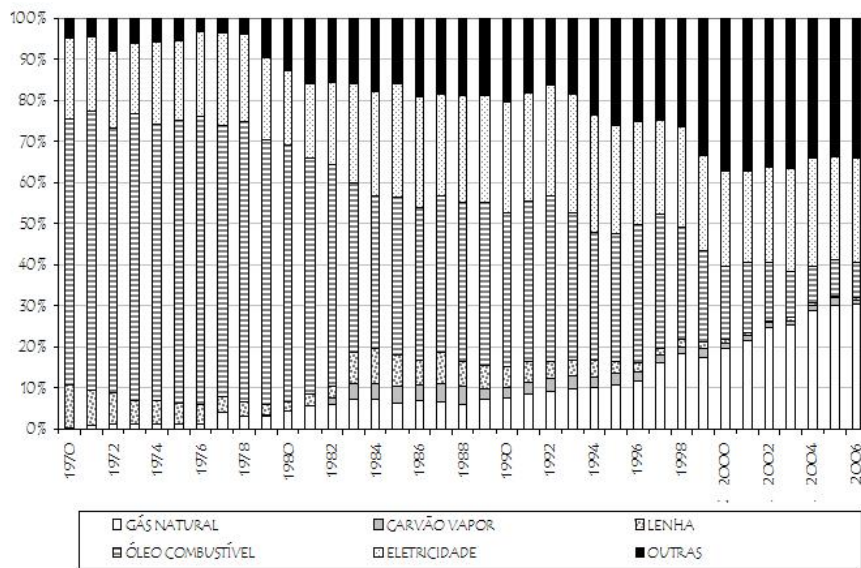


FIGURA 52 - EVOLUÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA DO SETOR QUÍMICO

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do MME (2007).

Matriz Energética do Setor Químico (2006)

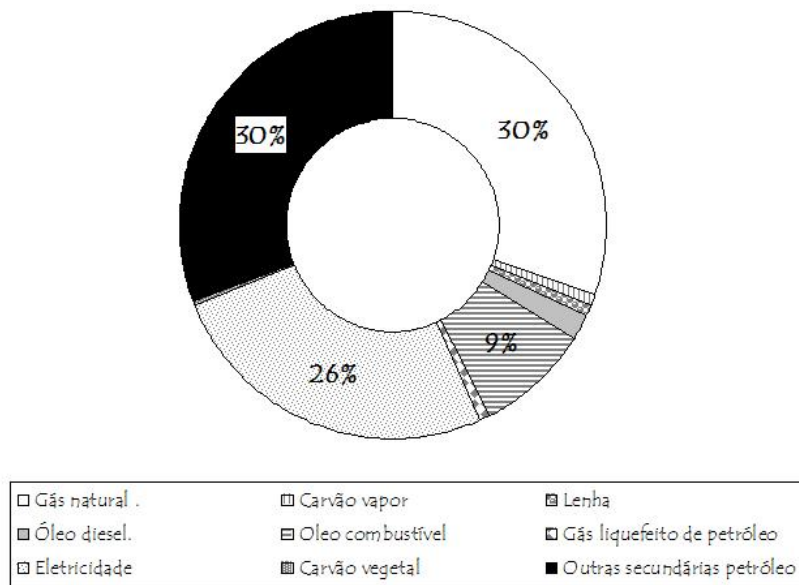


FIGURA 53 - MATRIZ ENERGÉTICA DO SETOR QUÍMICO (2006)

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do MME (2007).

A dependência de derivados de petróleo representa um fator de vulnerabilidade para a indústria petroquímica, além de outro fator que é o grande potencial de emissão de gases de efeito estufa. Nesse sentido, torna-se importante à busca de alternativas a médio e a longo prazo, estimulando o desenvolvimento de novas rotas de produção e tecnologias alternativas.

A pirâmide de reciclabilidade elaborado pelo *Greenpeace* - (FIGURA 54) - apresenta faixas de periculosidade, incluindo processos de produção, aditivos usados, emissão do produto durante o uso, eliminação e reciclagem. Destacam-se, neste sentido, os biopolímeros, a exemplo das resinas menos poluentes e 100% recicláveis. Essas apresentam maior grau de utilização nos processos de reciclagem mecânica e praticamente não utilizam aditivos de maior complexidade sob o ponto de vista de impacto no meio ambiente e ainda têm potencial reduzido para formação de dióxidos de carbono (CO₂) durante a queima.

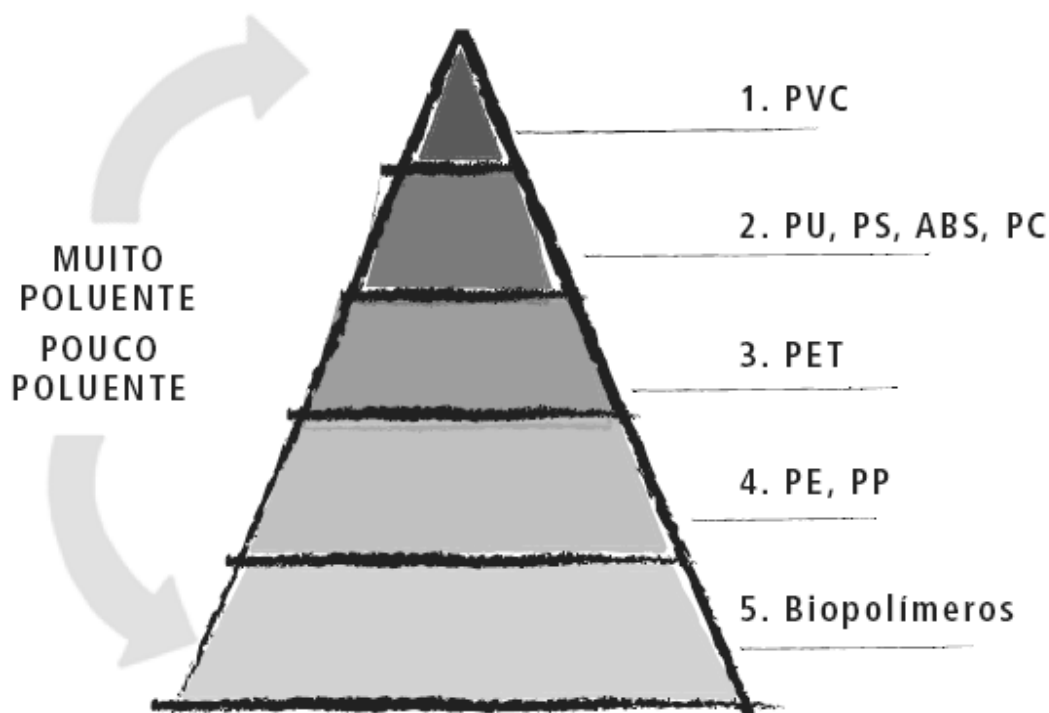


FIGURA 54 - PIRÂMIDE DE RECICLABILIDADE DE PRODUTOS PETROQUÍMICOS

Fonte: www.greenpeace.org apud Suzano Petroquímica (2007)

Schuchardt *et al* (2001) considera, para o caso brasileiro, a biomassa como substituto natural para o petróleo. Além de ser renovável, a biomassa reduz a poluição, pois é formada a partir de CO₂ e H₂O, aproveitando a energia solar. Acrescenta-se a isso ainda, a possibilidade da utilização de resíduos agrícolas subutilizados nessa conversão da biomassa em insumos petroquímicos. Para tanto, estima-se a necessidade de 1% da biomassa anualmente produzida no país.

As estratégias apresentadas por Schuchardt *et al* (2001) envolvem a transformação de componentes principais da biomassa em insumos petroquímicos, tal como a obtenção do polietileno a partir dos carboidratos via fermentação por etanol, desidratação e polimerização. No caso de produtos que não podem ser facilmente obtidos a partir da biomassa, sugere-se a substituição por produtos similares, como, por exemplo, no caso do polietileno tereftalato (PET) em que sugere a substituição do ácido tereftálico pelo ácido 2,5-furanodicarboxílico, que pode ser facilmente obtido a partir de frutose (obtida da hidrólise da sacarose) via ciclização ácida e posterior oxidação.

Schuchardt *et al* (2001) apresenta ainda exemplos já utilizados em escala industrial, mais especificamente pela Companhia Pernambucana de Borracha (COPERBO) que produz polibutadieno e copolímeros a partir de butadieno, obtido por desidrogenação de etanol para acetaldeído, condensação aldólica, hidrogenação, desidratação e polimerização do butadieno.

A empresa Braskem também iniciou em 2006 pesquisas para desenvolver tecnologias para viabilizar a produção de resinas a partir de insumos renováveis, como alternativa ao uso de petróleo. Essas resinas, denominadas polímeros verdes, são obtidas a partir de cana-de-açúcar ou biomassa, em um processo industrial que promove a conversão de etanol em petroquímicos básicos, tais como o eteno e o propeno. A empresa pretende ainda a venda de créditos de carbono, já que a soma de todas as etapas da cadeia de produção de uma tonelada de polímeros verdes evita a emissão de 200 kg de dióxido de carbono (BRASKEM, 2006). É importante destacar também, que as potencialidades de utilização da biomassa na indústria petroquímica não estão restritas apenas à utilização da mesma como insumos materiais, já que também pode ser usada como energéticos, conforme se evidencia no estudo do caso da Suzano Petroquímica.

Ainda em relação a alternativas energéticas nas indústrias petroquímicas, ressaltam-se as experiências da Braskem no aproveitamento de plásticos pós-consumo. A empresa já prevê a implantação do projeto de geração de energia baseado na queima de polímeros. No caso da Unidade Insumos Básicos, destaca-se estudos da viabilidade de obtenção de combustíveis alternativos a partir de resíduos sólidos. Assim, o aterro sanitário de Salvador poderá contribuir para a diversificação da matriz energética dessa Unidade.

4.4.1 SUZANO PETROQUÍMICA

As unidades industriais da Suzano Petroquímica estão localizadas em Mauá (SP), Duque de Caxias (RJ) e Camaçari (BA), com capacidades de produção de 360 mil toneladas por ano, 300 mil toneladas por ano e 125 mil toneladas por ano, respectivamente. Para tanto, essas unidades recebem energia elétrica de concessionárias públicas, de empresas próximas que geram excedentes e centrais de utilidades dos pólos petroquímicos onde estão situadas. Já o vapor, é gerado em caldeiras próprias ou comprado de empresas vizinhas.

A Suzano Petroquímica (2007) estabeleceu diretrizes para suas unidades industriais relacionadas ao consumo de energia, sendo elas: a) uso racional da energia, de modo a garantir o suprimento em longo prazo, com segurança e preços competitivos, considerando os aspectos ambientais; b) usar com moderação os combustíveis fósseis, dando preferência à utilização de energia renovável e substituir as fontes não-renováveis sempre que possível; c) usar a energia com eficiência, utilizando todas as tecnologias disponíveis.

De acordo com a Suzano Petroquímica (2007), o consumo de energia elétrica por tonelada de produção em suas unidades industriais foi de aproximadamente 175 MWh no ano de 2006, sendo 50% desse total consumido pela unidade de Mauá (FIGURA 55). Nesta unidade, a energia elétrica é gerada a partir de uma combinação de fontes, tais como hidrelétricas, termoeletricas e fontes alternativas (PCH, biomassa e gás natural), com fornecimento pela Eletropaulo, Duke Energy e Endesa. O vapor é gerado em caldeira própria a partir de gás natural fornecido pela Comgás.

Consumo de Energia Elétrica na Suzano Petroquímica (2006)

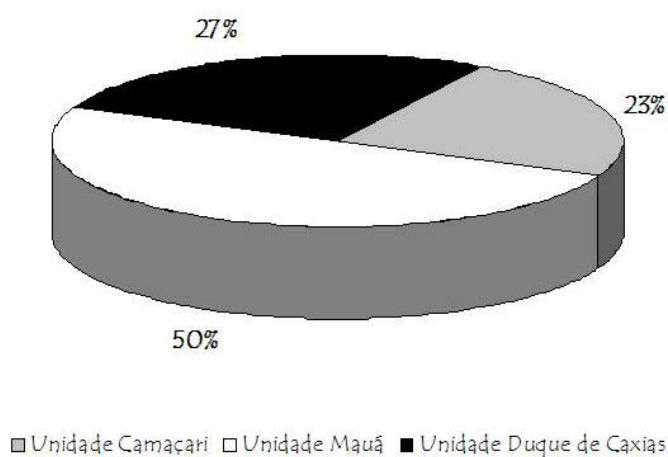


FIGURA 55 - CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA SUZANO PETROQUÍMICA

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da Suzano Petroquímica (2007)

Já na Unidade Duque de Caxias, a energia elétrica é gerada pela usina hidroelétrica de Cachoeira Dourada em Goiás e o vapor é gerado pela Petroflex a partir de gás natural. Na Unidade de Camaçari, a energia elétrica é gerada por usina hidroelétrica e gerador a gás; o vapor é produzido a partir de óleo combustível, gás natural e gases residuais do processo fornecidos pela central de utilidades da Braskem. A Unidade dispõe ainda de uma caldeira para geração de vapor de baixa pressão a partir da queima de gases residuais do processo. (SUZANO PETROQUÍMICA, 2007).

A análise da matriz energética dessas unidades industriais permite a identificação de algumas iniciativas de autogeração de energia, tal como a queima de gases residuais na Unidade de Camaçari. O modelo de segurança energética da Suzano Petroquímica prevê a utilização, com moderação, de combustíveis fósseis, dando preferência à energia renovável, sempre que possível. (SUZANO PETROQUÍMICA, 2007).

De acordo com a Suzano Petroquímica (2007), a utilização de energia varia com o perfil de produção de cada unidade, devido aos diferentes requisitos de cada tipo de produto. Embora haja uma avaliação quanto ao consumo de energia em cada *grade*, ainda não há avaliação de ecoeficiência dos diversos produtos. A Figura 56 apresenta os dados consolidados dos anos de 2004 a 2006 relativos ao consumo de energia elétrica por unidade industrial, considerando-se o processo produtivo e atividades administrativas.

A Unidade Camaçari apresenta os maiores consumos específicos de energia, seja elétrica ou vapor. Segundo a Suzano Petroquímica (2007), essa unidade iniciou projetos de conservação de energia em parceria com a Shell, em que se estimam reduções de consumo de energia da ordem de 20%. Ações de melhoria já implementadas propiciaram uma economia de energia de 2,1 mil MWh em 2006. Como exemplo, cita-se melhorias do processo em troca de catalisador e ganho energético estimado de 3,98 kWh/tpp. Problemas operacionais ocorridos levaram à redução da produção sem redução de consumo proporcional. Assim, essa redução ainda não pôde ser evidenciada no índice de consumo específico do ano de 2006. (FIGURA 56)

Consumo Específico de Energia Elétrica na Suzano Petroquímica

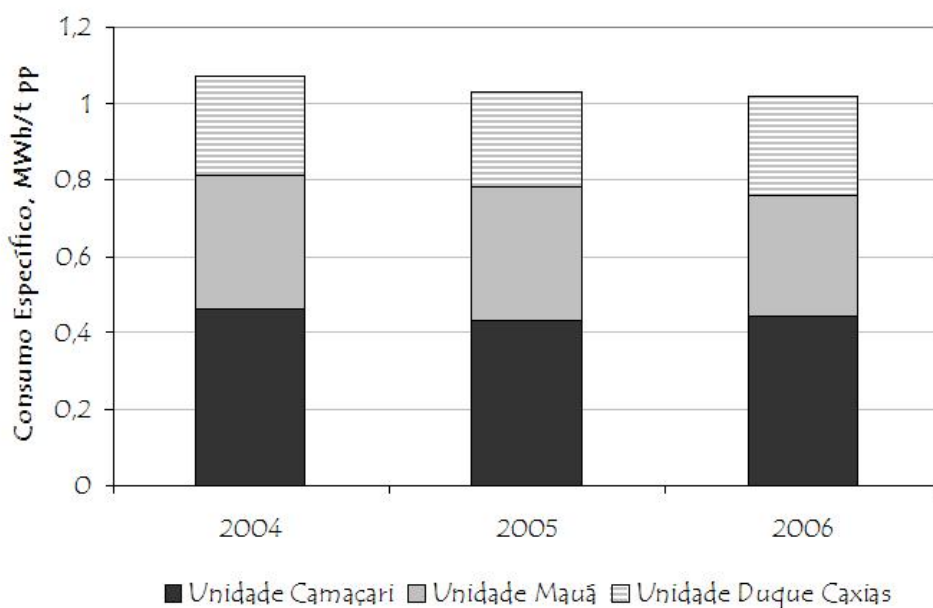


FIGURA 56 - CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA NA SUZANO PETROQUÍMICA

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da Suzano Petroquímica (2007)

Projetos de conservação de energia também estão sendo desenvolvidos e implementados pelas demais unidades da Suzano Petroquímica. Em Mauá, citam-se: o reaproveitamento de condensado e a substituição de purgadores por outros mais eficientes com a redução do consumo energético em 14 mil GJ/ano, bem como a substituição dos sistemas de ar condicionado no prédio administrativo com a consequente redução do consumo de energia elétrica. Na Unidade Duque de Caxias, o ganho energético propiciado pela substituição de purgadores encontra-se em fase de avaliação.

O projeto de expansão da unidade Duque de Caxias prevê um aumento do consumo de energia elétrica de 6%, devido à instalação de novos equipamentos necessários para atualização tecnológica do processo de produção e maior flexibilidade operacional assim como melhoria da qualidade do produto. Entretanto, o consumo total de energia será reduzido devido ao menor consumo específico de vapor: cerca de 20%. (SUZANO PETROQUÍMICA, 2007)

A Suzano Petroquímica mantém nas unidades programas de avaliação e controle de emissões atmosféricas, adotando como diretriz para controle de emissões atmosféricas a utilização de tecnologias mais limpas em todos os processos, bem como a substituição de produtos que contribuam para a degradação da qualidade do ar. Ações propostas para o ano de 2007 incluíam: avaliação dos processos produtivos para identificar oportunidades de redução de emissões; aprimoramento dos padrões de manutenção e de projeto, avaliação de alternativas para reduzir emissões de gases por empilhadeiras e veículos de frota (uso de combustíveis alternativos); implantação de sistema para acompanhamento das emissões de veículos de frota. (SUZANO PETROQUÍMICA, 2007)

O acompanhamento dos indicadores de emissões é realizado mensalmente para de CO₂, calculados a partir do balanço de massa e de fatores de emissão. As emissões de NO₂ e de N₂O são calculadas anualmente com base no balanço de massa (FIGURA 57). É importante destacar que na operação da Suzano Petroquímica não se observa emissão significativa de óxidos de enxofre, SO_x.

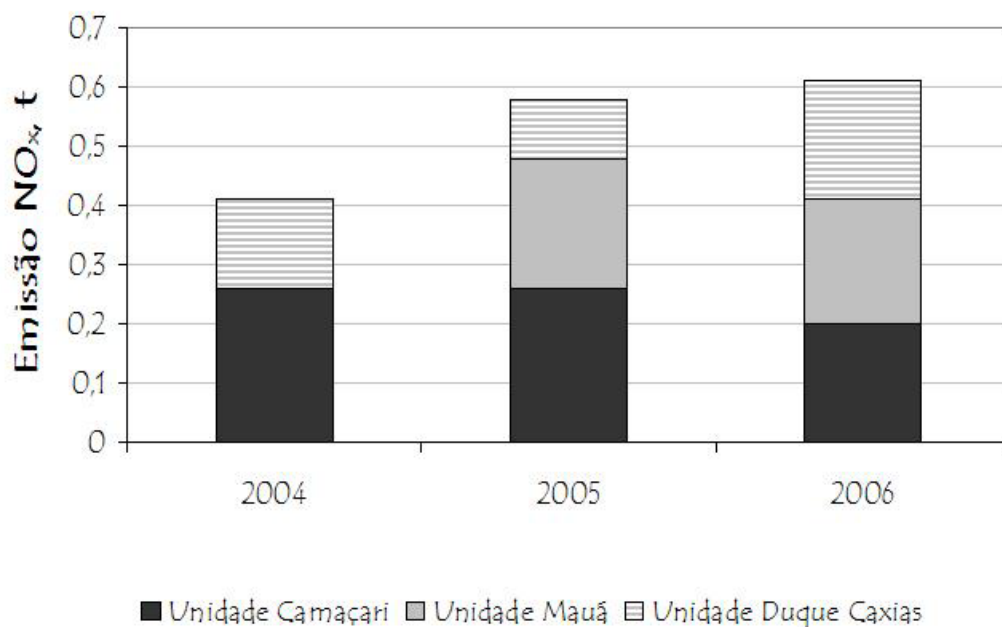


FIGURA 57 - EMISSÃO DE NO_x E N₂O NA SUZANO PETROQUÍMICA

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da Suzano Petroquímica (2007)

As emissões de GEE da Suzano Petroquímica são provenientes das caldeiras das Unidades Mauá e Camaçari, bem como dos *flares* - dispositivo onde são queimados os gases não aproveitados da unidade de processamento - das Unidades de Mauá e de Duque de Caxias. Estes, normalmente, são mantidos com chama piloto a propeno (Unidade de Duque de Caxias) e a gás natural (Unidade de Mauá) e queimam grandes volumes apenas em situações de emergência.

Na Figura 58 são apresentados os resultados de emissões de CO₂ das unidades da Suzano Petroquímica, em que se observa que a maior contribuição é proveniente da unidade Mauá. De acordo com a Suzano Petroquímica (2007), a operação do *flare* da Unidade de Mauá, em situações de falta de energia elétrica, provoca a emissão de fumaça preta acima dos limites permitidos e já foi objeto de reclamação da comunidade e notificação do órgão ambiental. Sendo assim, no ano de 2007 estava prevista a avaliação de alternativas tecnológicas para os sistemas de *flare*, de modo a reduzir a geração de fumaça preta em situações de emergência. Já o aumento da emissão observado na Unidade de Camaçari ocorreu devido à instalação da caldeira para queima de gases que não reagiram no processo de redução das emissões de compostos orgânicos voláteis.

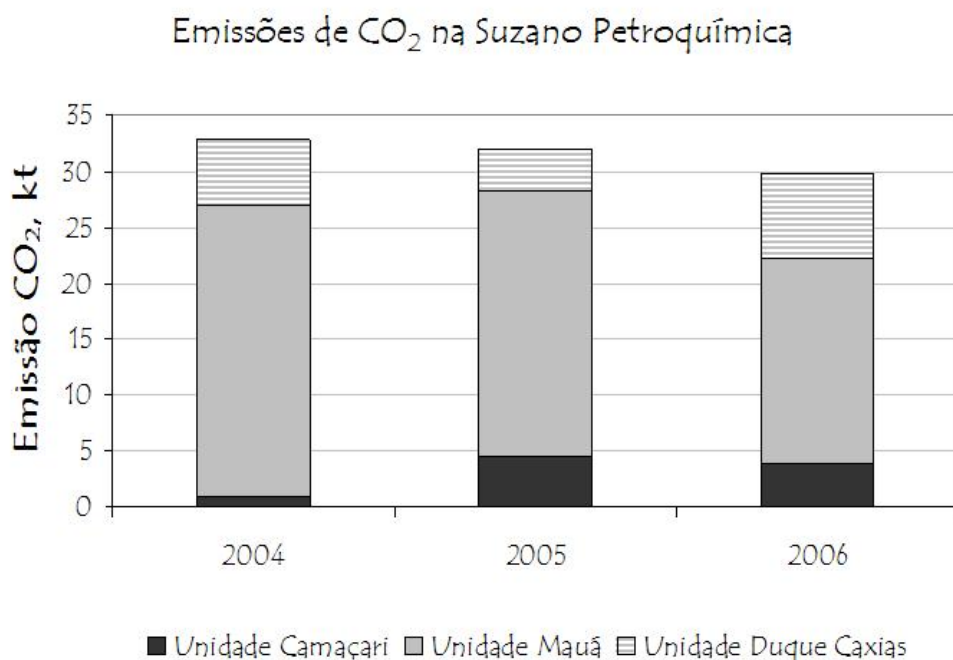


FIGURA 58 - EMISSÃO DE CO₂ NA SUZANO PETROQUÍMICA

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da Suzano Petroquímica (2007)

4.5 Indústria Siderúrgica

A produção do aço está associada a um consumo intensivo de energia e materiais e as significativas emissões de poluentes e resíduos. Segundo Costa (2002), uma das características marcantes desse processo é a formação de subprodutos energéticos e materiais que podem ser reciclados na própria planta ou transferidos para outros setores da economia.

Costa (2002) considera o processo de produção de aço como uma seqüência de unidades operacionais conectadas para a transformação de materiais por meio do uso de energia. Assim, neste item há uma descrição sumária de tal processo, em conformidade com o referido autor. (FIGURA 59)

Em termos tecnológicos, esse segmento vem se desenvolvendo com duas rotas básicas correspondentes às usinas integradas e semi-integradas. A diferença fundamental encontrada entre ambas é a matéria-prima básica para a obtenção do aço, que pode ser o minério de ferro, os carvões coqueificáveis e a sucata.

Na rota integrada, os minérios de ferro e o carvão mineral constituem os principais elementos para a produção do aço, enquanto que na rota semi-integrada, as matérias-primas fundamentais são a sucata e a energia elétrica. De acordo com Zanoni (2004), no caso brasileiro, que possui a quarta maior reserva mundial de minério de ferro - aproximadamente 6,1% das reservas mundiais - a indústria siderúrgica apresenta a rota tecnológica integrada como predominante, apesar da expansão das usinas que operam fornos elétricos e que tem como matéria-prima a sucata.

O processo de obtenção do aço via rota integrada decorre de uma série de operações de transformações metalúrgicas, iniciando-se pela preparação das matérias-primas nas fases de sinterização e coqueificação.

De acordo com Costa (2002), a sinterização é um processo de aglomeração a quente que consiste na transformação do minério de ferro - e de outros materiais complementares, tais como fundentes e finos de coque - em um produto denominado sínter. Esse produto é uma fonte metálica para a carga do alto-forno, que é submetida a uma operação redutora-oxidante a temperaturas na faixa de 1.200 a 1.400°C, utilizando-se para isto o coque como combustível principal e gases (GCO, GAF e GN) como combustíveis auxiliares e de ignição.

Na Coqueria, diversos tipos de carvão mineral são misturados e aquecidos a temperaturas da ordem de 1.000°C para a liberação da umidade volátil do carvão, resultando no coque. Nos alto-fornos, o coque atua como principal agente redutor dos óxidos de ferro, bem como fonte térmica do processo.

No processo de coqueificação, há geração de gases, cujo recolhimento e tratamento possibilitam a recuperação de frações condensáveis comercializáveis, tais como o benzeno, o tolueno e o xileno, além do alcatrão, que pode ser utilizado em caldeiras. O aproveitamento do gás como

combustível pode ser verificado nas caldeiras, bem como na própria coqueria, nos fornos de reaquecimento, nos altos-fornos, além da sinterização.

Uma mistura de coque e de sínter é introduzida no Alto-forno, onde ocorre a operação de redução do minério de ferro em ferro-gusa. A retirada do ferro-gusa no estado líquido dá-se pela parte inferior do Alto-Forno, sendo que as impurezas constituem a escória. Na aciaria a oxidação da carga permite a redução da concentração de carbono em níveis inferiores a 2%. (Costa, 2002)

De acordo com Costa (2002), a gaseificação do coque no interior do Alto-Forno permite sua utilização tanto como agente redutor quanto como combustível. Temos assim, um gás rico em CO, denominado BFG (*Blast Furnace Gas*) ou GAF (gás de Alto- Forno), que é conduzido a sistemas de despoejamento e lavagem. A partir daí, uma parte do gás é direcionada aos regeneradores para pré- aquecimento de ar e outra parte segue como combustível para outras etapas.

O processo continua com o resfriamento controlado do aço líquido, que é vazado nas lingoteiras e, ao ser resfriado, toma a forma de lingotes que depois são levados para fornos de reaquecimento (fornos-poço) que os preparam para serem laminados. Temos assim, o processo denominado Lingotamento.

A Laminação do aço consiste em diversas etapas em série que dão forma diferenciada aos produtos, ou seja, chapas, bobinas, barras, perfis ou fios. Nas linhas de acabamento destacam-se o passe de encruamento no Laminador de Acabamento, o aparamento de bordas na Linha de Tesouras ou a subdivisão em bobinas menores. Temos assim, após o rebobinamento das tiras, o produto final. (Costa, 2002)

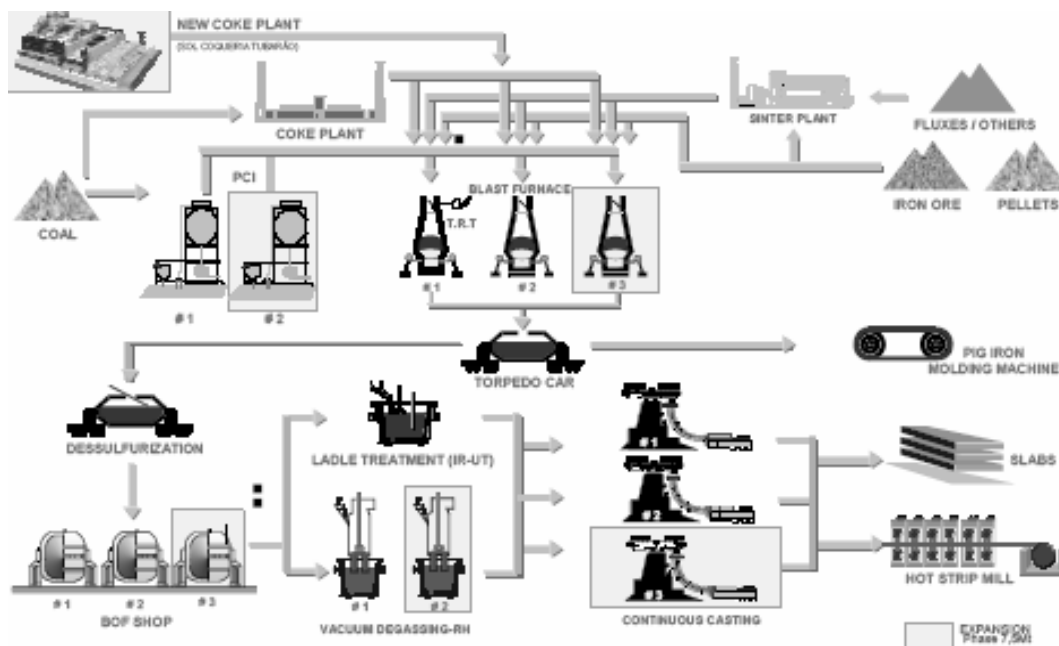


FIGURA 59 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO PRODUTIVO DO AÇO.

Fonte: ARCELOR MITTAL (2007)

O segmento ferro-gusa e aço está entre um dos mais eletro-intensivos do setor industrial. O consumo final desse segmento em relação ao setor industrial apresenta-se em redução nas últimas décadas, mantendo-se em torno de 24% desde 1996. (FIGURA 60) Costa (2002) justifica tal redução com as melhorias de eficiência e consumo de energia da indústria siderúrgica.

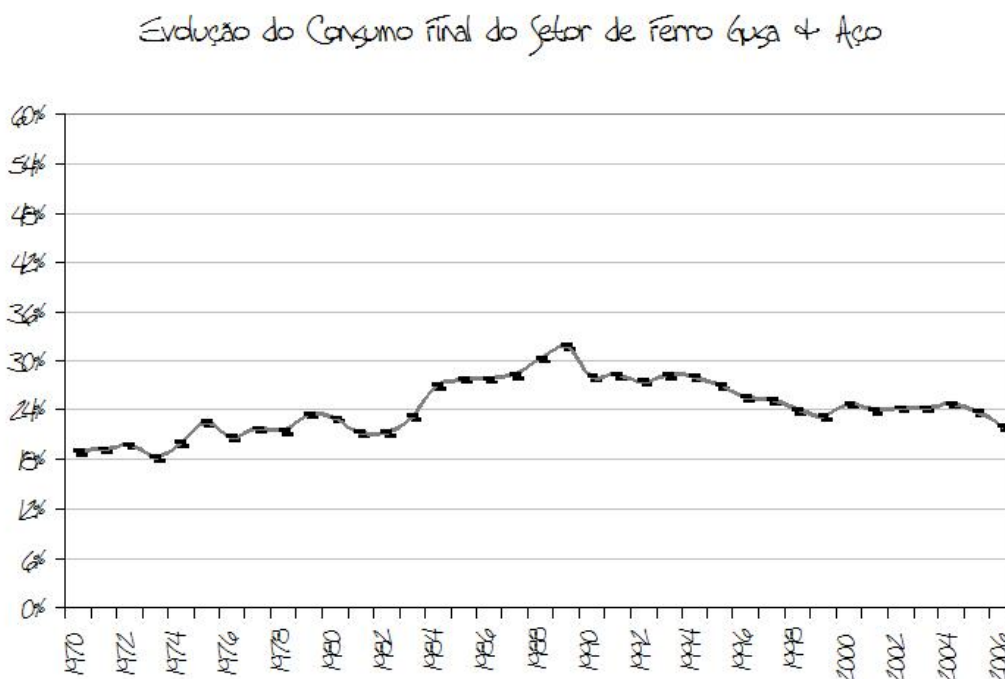


FIGURA 60 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO FINAL DO SETOR DE FERRO LIGAS E AÇO RELATIVA AO TOTAL DO SEGMENTO INDUSTRIAL

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do MME (2007)

O segmento ferro-gusa e aço apresenta-se, dentro do setor industrial, como um dos maiores consumidores de carvão, seja de origem vegetal ou mineral (coque), representando cerca de 60% de sua matriz energética. A participação do gás de coqueria na matriz energética, apesar de pouco expressiva (6%), é bastante interessante do ponto de vista de reaproveitamento de resíduos do processo. O consumo de energia elétrica representa 8% da matriz energética (FIGURA 61). Historicamente, observa-se uma tendência de redução do consumo de óleo combustível, compensado pela introdução do gás natural e, principalmente, por outras fontes de energia (FIGURA 62).

Matriz Energética – Setor Ferro Gusa + Aço (2006)

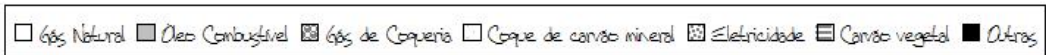
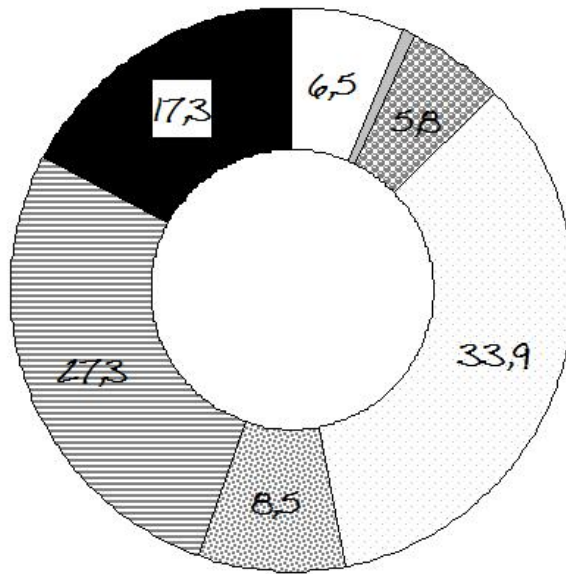


FIGURA 61 - MATRIZ ENERGÉTICA DO SETOR FERRO GUSA E AÇO (2006)

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do MME (2007).

Evolução da Matriz Energética – Setor Ferro Gusa + Aço

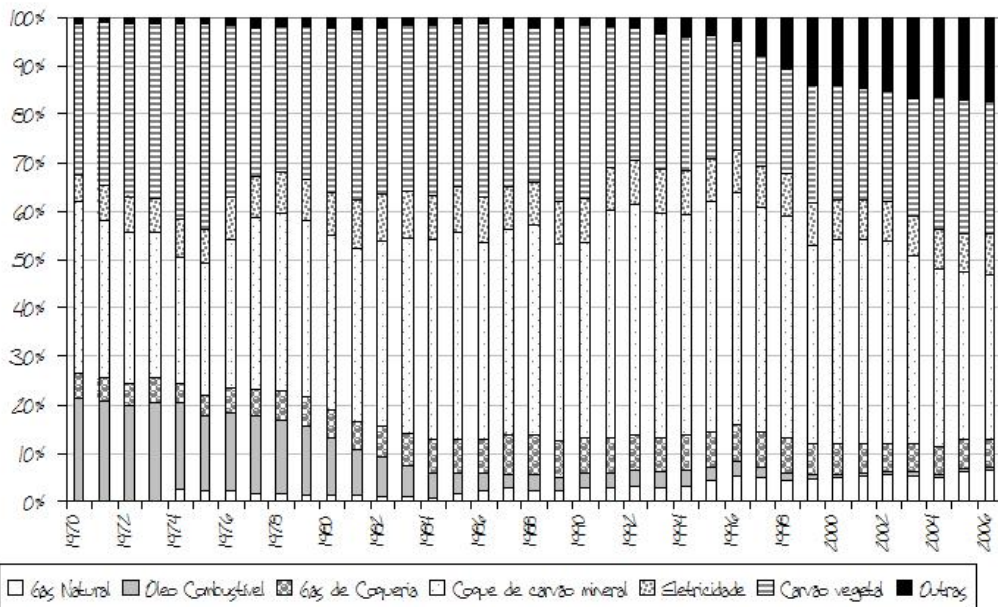


FIGURA 62 - EVOLUÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA FERRO GUSA E AÇO

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do MME (2007).

Além das melhorias da eficiência e consumo de energia, nas duas últimas décadas a indústria siderúrgica também reduziu as emissões de poluentes. As emissões atmosféricas de particulados, óxidos de carbono, nitrogênio, enxofre, metais pesados e de compostos orgânicos e ácidos estão entre os mais significativos problemas ambientais da produção de aço. De acordo com Costa (2002), as tecnologias de abatimento de poluentes atmosféricos podem ser classificadas em dois grupos principais: controle de poluição (CP) e prevenção de poluição (PP).

As tecnologias de controle de poluição referem-se a sistemas de controle de gases, destacando-se os ciclones, precipitadores eletrostáticos, scrubbers úmidos e filtros. A Tabela 5 apresenta uma síntese dos principais sistemas disponíveis, incluindo o princípio de remoção de partículas, vantagens e desvantagens.

No caso de tecnologias de prevenção a poluição (PP) destaca-se as modificações tecnológicas, alteração ou redução de insumos (materiais e energéticos), procedimentos operacionais e de manutenção, além da reciclagem interna. Temos assim, a interface entre os estudos de eficiência energética e prevenção de poluição.

TABELA 5: TECNOLOGIAS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO

Item	Sistema	Princípio	Vantagens	Desvantagens
01	Ciclone	Separação de partículas do gás de exaustão por forças centrífugas	(i) Separação de partículas da faixa superior de diâmetro.	(i) Menor eficiência de remoção de partículas
02	Precipitador eletrostático	Aplicação carga elétrica sobre as partículas presentes no gás, que permitem que estas sejam atraídas e capturadas por um eletrodo condutor.	(i) Eficiência de remoção superior a 90%; (ii) Baixo consumo de energia	(i) Inadequados para partículas de alta resistividade.
03	Scrubbers úmidos	Separação de uma ampla faixa de poluentes pela lavagem do gás de exaustão com aspersão de água.	(i) Eficiência de remoção superior a 90% (ii) Consumo de energia moderado.	(i) Necessidade de sistemas de tratamento para o efluente líquido ou lama formado.
04	Filtros	Separação de partículas do gás de exaustão por intermédio de material poroso.	(i) Altas eficiências de remoção	(i) Consumo de energia é elevado; (ii) Operação limitada em função de faixas de temperatura e umidade dos gases.

Fonte: Costa (2002)

4.5.1. ARCELOR MITTAL BRASIL

O Grupo Arcelor Brasil é resultado da integração de unidades da Belgo Siderurgia e Companhia Siderurgia Tubarão (CST), além da Vega do Sul. Temos assim, a atuação da Arcelor Brasil nas áreas de negócio de aços longos e planos. A Tabela 6 relaciona as unidades da Arcelor Mittal no Brasil, com uma breve descrição e destaque para área de atuação.

TABELA 6 - UNIDADES INDUSTRIAIS DA ARCELOR MITTAL NO BRASIL

Item	Unidade	Negócio	Descrição
01	Usina de Monlevade	Aços Longos	Unidade siderúrgica integrada, a usina de Monlevade, em Minas Gerais, é a única da América Latina a possuir instalações e qualidade de processo adequados para a produção de steel cord (cordonéis de aço para reforço de pneus radiais). Tem capacidade para produção de 1,2 milhão de toneladas anuais de fio-máquina para aplicações industriais e na agropecuária..
02	Usina de Juiz de Fora	Aços Longos	A usina de Juiz de Fora, em Minas Gerais, é uma minimill que trabalha com sucata e gusa e produz laminados longos de aço e trefilados. Tem capacidade para 1 milhão de toneladas/ano de aço e 226 mil toneladas/ano de trefilados. Seus produtos têm larga aplicação na construção civil, na indústria e na agropecuária.
03	Usina de Piracicaba	Aços Longos	A usina de Piracicaba, em São Paulo, é uma minimill especializada na produção de vergalhões para a construção civil, utilizando sucata de aço como principal insumo em sua aciaria elétrica. A unidade tem capacidade para a produção de 1 milhão de toneladas/ano.
04	Usina Grande Vitória	Aços Longos	A usina Grande Vitória, localizada em Cariacica, no Espírito Santo, é uma minimill que produz aços laminados, perfis leves e médios para construção mecânica, torres de transmissão de energia e telecomunicações. Sua capacidade instalada atual é de 500 mil toneladas/ano de aço bruto e de 440 mil toneladas/ano de laminados(perfis).
05	Usina de Itaúna	Aços Longos	Arrendada pela Itaúna Siderúrgica (controlada da Belgo Siderurgia), a usina de Itaúna, em Minas Gerais, tem capacidade instalada para 100 mil toneladas/ano de barras e perfis, produzidos a partir de tarugos recebidos de outras unidades da empresa. Seus produtos destinam-se à indústria de serralheria e estruturas metálicas, indústria moveleira e metalurgia em geral.
06	Fábrica de Telas e Treliças	Aços Longos	Instalada em São Paulo, junto ao município de Guarulhos, a Fábrica de Telas e Treliças tem capacidade anual para 60 mil toneladas de produtos destinados principalmente ao mercado consumidor daquele estado.
07	Fábrica de Sabará	Aços Longos	É a unidade pioneira da Belgo, tendo sido criada em 1919, em Sabará, Minas Gerais. Produz barras destinadas à indústria automobilística, com alto nível de tecnologia, qualidade, produtividade e segurança.
08	BBA – Belgo Bekaert Arames	Aços Longos	Opera quatro trefilarias, localizadas nos municípios de Contagem e Sabará, em Minas Gerais, e Osasco e Hortolândia, em São Paulo. Com capacidade total de produção de 700 mil toneladas/ano de trefilados, fabrica arames para aplicações industriais, de uso geral, para transmissão de energia, telecomunicações, soldas, agropecuária e para concreto protendido.
09	BMB – Belgo Bekaert Artefatos de Arame	Aços Longos	Mantém duas trefilarias, localizadas nos municípios de Vespasiano e Itaúna, em Minas Gerais, produzindo steel cord (cordonéis de aço para reforço de pneus radiais) e hose wire (arame para reforço de mangueiras) a partir do fio-máquina fornecido pela usina de Monlevade. Sua capacidade de produção é de 50 mil toneladas/ano
10	BBN – Belgo Bekaert Nordeste	Aços Longos	Trefilaria instalada no município de Feira de Santana, na Bahia, produz pregos e arames para agropecuária. Tem capacidade instalada para 70 mil toneladas/ano.
11	CAF Santa Bárbara	Aços Longos	Fornece madeira e carvão vegetal para produção de ferro-gusa, atendendo, direta e indiretamente, as unidades da Belgo. Possui reservas florestais de eucalipto totalizando 100 mil hectares e reservas florestais nativas, totalizando 60 mil hectares, localizadas nos estados de Minas Gerais, Espírito Santo e Bahia.
12	Vega do Sul	Aços Planos	Localizada no município de São Francisco do Sul, em Santa Catarina, é uma unidade especializada na produção de laminados a frio e galvanizados. Do total da produção, cerca de 70% tem como destinação o exigente mercado automotivo. Tem capacidade instalada de produção de 800 mil toneladas/ano de aços laminados a frio e 500 mil toneladas/ano de galvanizados.
13	CST	Aços Planos	Unidade siderúrgica integrada está localizada na divisa dos municípios de Vitória e Serra, na região metropolitana da Grande Vitória, no Espírito Santo. Especializada na produção de aços de maior valor agregado ofertados ao mercado sob a forma de placas e de bobinas a quente. Tem capacidade instalada de produção de 5 milhões de toneladas/ano.

Fonte: Arcelor Mittal (2006)

Dentre as unidades industriais da Arcelor Mittal, destaca-se Tubarão, localizada no município de Serra, no Espírito Santo. A Unidade Tubarão é uma indústria siderúrgica integrada a coque, destinada a produção de placas e bobinas de aço, com capacidade instalada de 5 Mt/ano. Contribuindo com 15% da produção nacional de aço, essa unidade destaca-se como a 4ª maior produtora de aço do Brasil.

A produção de aço da Arcelor Mittal Tubarão é baseada no carvão mineral como fonte energética, sendo os principais processos produtivos a Coqueria, a Sinterização, dois Altos-fornos, Dessulfuração de Gusa, Calcinação, Aciaria, Refino do aço, Lingotamentos Contínuos e Laminação de Tiras à Quente. Assim, essa Unidade apresenta matriz energética com participação expressiva de carvão e derivados como insumos: superior a 90%. A utilização de petróleo, gás natural e energia elétrica representam cerca de 1% da sua matriz energética que é completada com a utilização de antracito. Evidencia-se assim, a eliminação do consumo de óleo combustível da matriz energética da Arcelor Mittal Tubarão. (FIGURA 63)

Em termos de disseminação de energias renováveis na matriz energética, destacam-se, na unidade de Juiz de Fora (MG), as iniciativas para a alimentação a carvão vegetal de dois alto-fornos em construção. O carvão será fornecido pela própria Arcelor Mittal, em parceria com produtores rurais que terão incentivos financeiros por meio do Programa Produtor Florestal (PPF).

Matriz Energética da Arcelor Mittal Tubarão (2006)

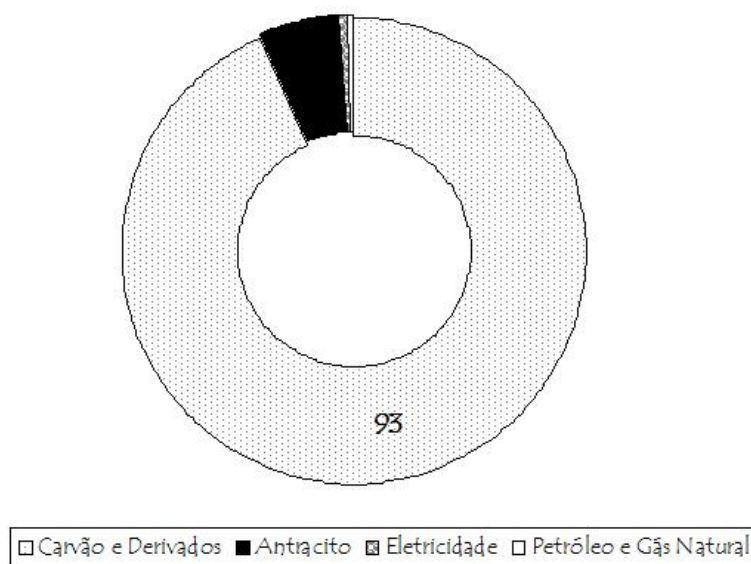


FIGURA 63 - MATRIZ ENERGÉTICA DA ARCELOR MITTAL TUBARÃO EM 2006

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da Arcelor Mittal (2007)

De acordo com a Arcelor Mittal (2006), o carvão vegetal, fabricado a partir de florestas plantadas de eucalipto, é uma alternativa sustentável ao meio ambiente, já que seus níveis de emissão de dióxido de carbono (CO₂) são bem inferiores aos resultantes da queima do carvão mineral. Além disso, as florestas de eucalipto em crescimento “seqüestram” gás carbônico da atmosfera, colaborando para reduzir o aquecimento global. Assim, estima-se uma redução de emissão de CO₂ de, aproximadamente, 9,5 milhões de toneladas em 7 anos.

A empresa florestal da unidade Belgo iniciou em 2005 investimentos no desenvolvimento de fornos com tecnologia para carbonização da madeira, para fins de redução da geração de metano nas unidades de produção de carvão. A expectativa da referida unidade é a de que deixarão de ser emitidas o equivalente a 2,5 milhões de toneladas de CO₂ até 2012. Os dados de 2005 já apontam uma redução de 4,5% das emissões de CO₂ em relação aos valores apurados em 2004.

No caso das emissões de SO₂ e NO_x, observa-se que, apesar da redução em termos absolutos, a alteração da emissão específica desses gases é pouco significativa. Isso sugere que há inexistência de medidas de controle, sendo os resultados obtidos, consequência da diminuição da produção. (FIGURAS 64 e 65)

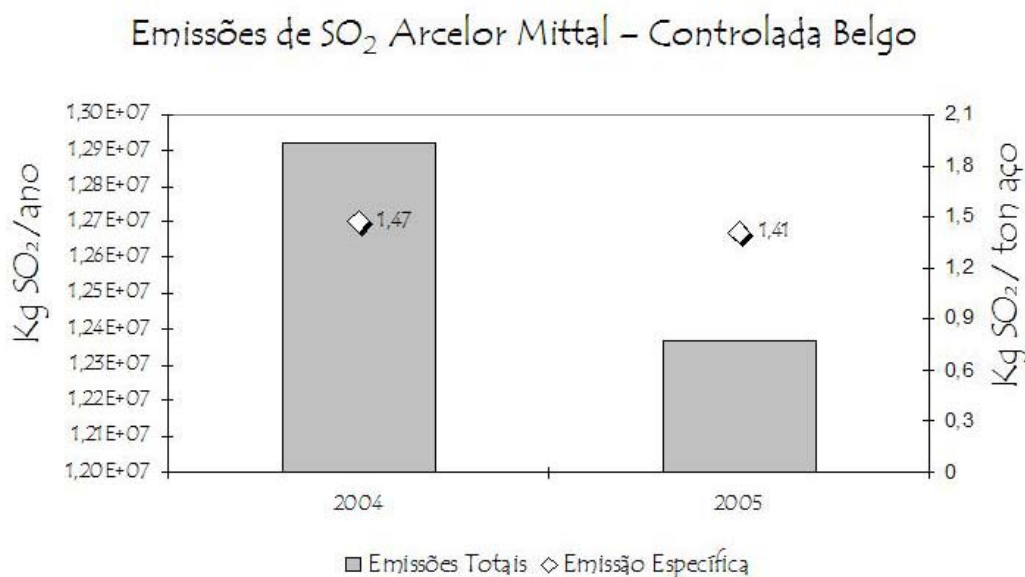


FIGURA 64 - EMISSÕES DE SO₂ NA ARCELOR MITTAL (CONTROLADA BELGO)

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da Arcelor Mittal (2006)

Emissões de NO_x Arcelor Mittal – Controlada Belgo

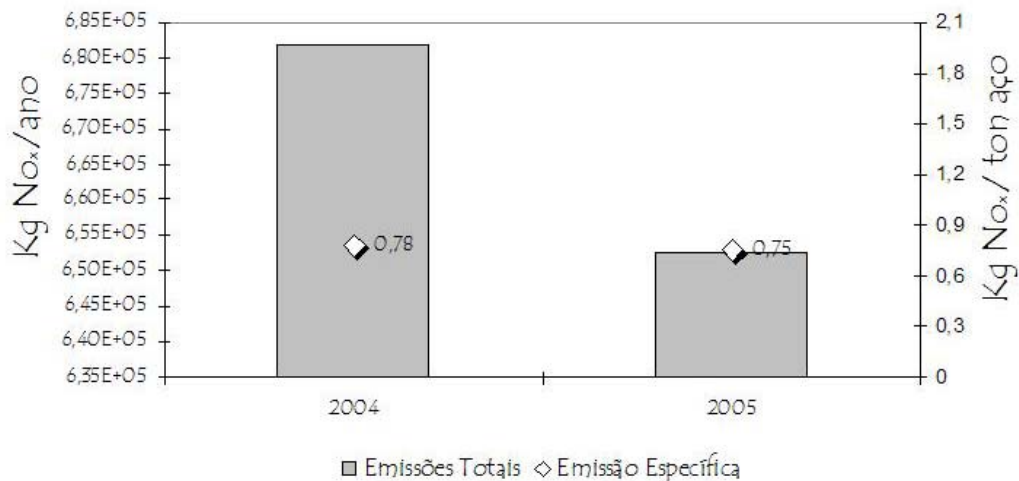


FIGURA 65 - EMISSÕES DE NO_x NA ARCELOR MITTAL (CONTROLADA BELGO)

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da Arcelor Mittal (2006)

Ainda em relação às estratégias para redução de emissões atmosféricas de GEE, a Arcelor Brasil destaca a estratégia da co-geração de energia elétrica. A redução das emissões de GEE, neste caso, relaciona-se ao deslocamento de parcela da eletricidade produzida na matriz elétrica nacional, ou seja, à produção da eletricidade que deixou de ser importada do sistema público de energia. A Arcelor Mittal Tubarão é um dos destaques nessa área que, desde sua implantação em 1983, segue o modelo de co-geração de energia, baseado no aproveitamento dos gases gerados no processo produtivo.(Arcelor Mittal, 2006)

A controlada CST obteve, em dezembro de 2005, a aprovação do projeto “Co-geração de Energia Elétrica a partir da recuperação do gás de aciaria (LDG – *Linz Donawitz Gas*)”, no âmbito do Governo Federal. O projeto prevê a recuperação do gás LDG para a co-geração de energia elétrica, evitando a emissão de um volume de aproximadamente 45 mil toneladas de CO₂ por ano. Assim, a CST (2005) destaca os seguintes objetivos desse projeto:

- ❑ Manter a estabilidade operacional e permitir a operação em regime normal do Laminador de Tiras a Quente.
- ❑ Ampliar o sistema de geração interna existente na CST e operar em paralelo com a concessionária de energia, contribuindo para a redução do efeito de *flicker* e oscilações de tensão na rede elétrica.
- ❑ Mitigar o impacto da entrada em operação de novas cargas que instaladas em função de expansões da produção, em relação a eficiência energética da empresa.
- ❑ Reduzir a necessidade de compra de energia elétrica durante a operação normal e principalmente durante as manutenções das CTE's, bem como disponibilizar o excedente de energia gerada internamente para o mercado.

Para tanto, o projeto contempla um sistema de recuperação de parcela de LDG¹ rica em CO, direcionando-a para as Centrais Termelétricas² para fins de co-geração de energia. Antes da implantação do projeto, o LDG gerado na Aciaria era queimado em *flare* na própria unidade. É interessante observar a flexibilidade da concepção desse projeto, que possibilita a queima de LDG nas centrais termelétricas simultaneamente à queima de outros gases gerados no processo industrial, tais como o Gás de Altos-Fornos e Gás de Coqueria.

A opção pela alteração da modalidade de transporte de Bobinas a Quente para barcaças oceânicas, em detrimento ao rodoviário, consiste em outro projeto de MDL da Arcelor Mittal Tubarão, em operação desde junho de 2006. Neste projeto, de duração de 07 anos, está prevista a redução das emissões de aproximadamente 120 mil toneladas de CO₂ por ano.

Em fevereiro de 2007, a Arcelor Mittal Tubarão iniciou a operação de novo projeto de MDL, na linha de co-geração de energia elétrica, cuja obtenção dar-se-á a partir da produção de coque processo *Heat Recovery*. Este projeto revê a recuperação do calor gerado na produção de coque da SOL Coqueria Tubarão, de forma a produzir energia elétrica e vapor, pó meio de trocadores de calor (HHS) e turbogeradores (SRG). Mais uma vez a unidade utiliza-se da estratégia de deslocamento das emissões equivalentes da parcela de geração térmica da matriz nacional, com uma previsão de aproximadamente 350 mil toneladas de CO₂ por ano.

A Figura 66 apresenta uma síntese dos projetos de MDL da Arcelor Mittal Tubarão, incluindo quantitativos da redução de emissões de CO₂ ao longo da duração dos projetos que variam de 8 a 10 anos. Observa-se claramente as modestas reduções de emissões do projeto de recuperação de LDG, face ao projeto de recuperação de calor de coqueria. A redução das emissões de CO₂ previstas em um ano de projeto de recuperação de calor de coqueria equivale à cerca de 80% do total de reduções em 10 anos do projeto de recuperação de LDG.

1 A composição básica do LDG é CO, CO₂, N₂ e vapores de água. O fato da presença de altos teores de CO possibilita a sua recuperação para co-geração de energia elétrica.

2 Esse tipo de recuperação foi possibilitado pela implantação da 4ª Central Termoelétrica (CTE #4).

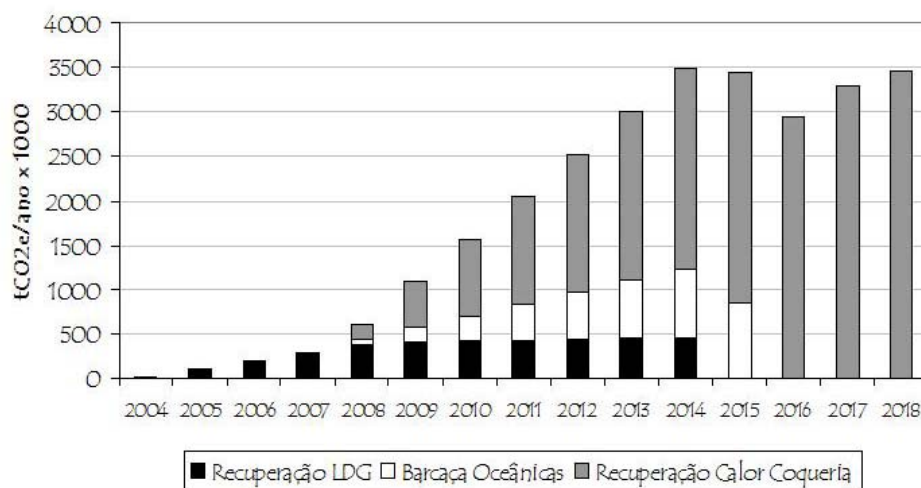


FIGURA 66 - CONTROLE DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) NA ARCELOR MITTAL TUBARÃO

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da Arcelor Mittal (2007)

Programas de redução de consumo também são considerados pela Arcelor Mittal como estratégias de eficiência energética. Assim, destaca-se, o Programa de Conservação de Energia nas unidades da controlada Belgo, cujo objetivo é a redução do consumo e a utilização racional de energia. Para tanto, essas unidades realizam campanhas por mudanças comportamentais e investimento em equipamentos de menor consumo, como os inversores de frequência e motores de alto rendimento. Acrescenta-se a isso ainda a redução da utilização do ar-comprimado, uso de escória espumosa no processo do forno elétrico e implantação de controle pneumático do fluxo de água das motobombas, com redução de potência consumida. (Arcelor Mittal, 2006)

A Arcelor Mittal (2006) tem considerado como práticas de eficiência energética os investimentos em equipamentos para geração interna de energia. É relevante nesse sentido, o reaproveitamento da energia dos gases gerados no processo produtivo, que é possibilitado pela existência de um modelo energético suportado pela existência de unidades de co-geração de energia como, por exemplo, Centrais Termelétricas, Turbina de Topo de Alto Forno e Apagamento à Seco do Coque. Assim, o modelo energético da Unidade Tubarão tende a auto-suficiência, incluindo venda do excedente de energia gerada no processo produtivo. (Figura 67)

Dados da Arcelor Mittal Tubarão divulgados em 2006 sugerem a quase auto-suficiência do modelo energético da unidade, com aquisição de apenas 3% da energia necessária à produção interna. Previsões para o ano de 2007 ³ já apontam o suprimento total de energia por autogeração, incluindo venda de excedentes bastante significativa, cerca de 20%. (FIGURA 68)

³ Os dados reais acerca da segurança energética na Arcelor Mittal Tubarão no ano de 2007 ainda não foram divulgados.

Modelo de Segurança Energética da Arcelor Mittal Tubarão

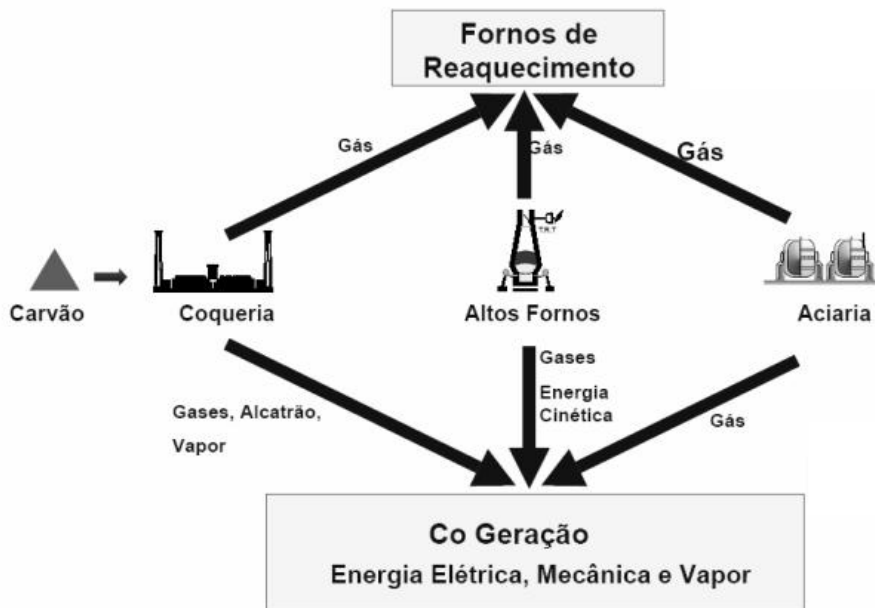


FIGURA 67 - MODELO DE SEGURANÇA ENERGÉTICA DA ARCELOR MITTAL TUBARÃO

Fonte: Arcelor Mittal (2007)

Segurança Energética na Arcelor Mittal Tubarão

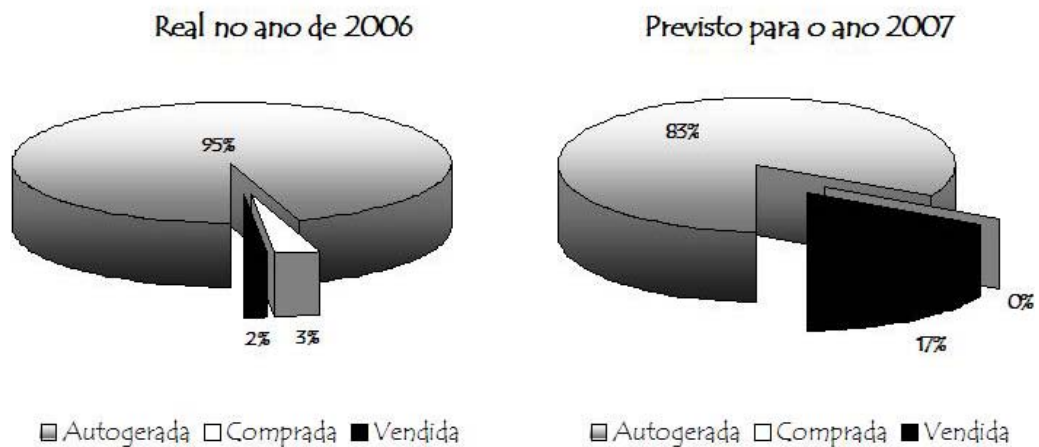


FIGURA 68 - SEGURANÇA ENERGÉTICA NA ARCELOR MITTAL TUBARÃO EM 2006

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da Arcelor Mittal (2006)

5 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Apesar das divergências teóricas em relação à definição de desenvolvimento sustentável, é fato que o conceito é unanimidade em todos os segmentos da sociedade, inclusive no setor industrial. Assim, entende-se por sustentabilidade energética industrial a exploração da capacidade empresarial de utilização do potencial energético encontrado nos ecossistemas, ao mesmo tempo em que se mantém a deterioração ambiental em um nível mínimo. Assim, constituem ações em direção a sustentabilidade energética industrial: reduzir a utilização de combustíveis fósseis, diminuir a emissão de substâncias poluentes, adotar políticas de conservação de energia e de recursos, substituir recursos não renováveis por renováveis e aumentar a eficiência em relação aos recursos utilizados, incluindo-se autogeração de energia.

Bellen (2007) considera o desenvolvimento e aplicação de sistemas de indicadores de mensuração de sustentabilidade uma estratégia para operacionalização do desenvolvimento sustentável. Gallopin (1996), *apud* Bellen (2007), ressalta o papel dos indicadores como ferramenta de simplificação de informações relevantes, de maneira tal que fatos que ocorrem na realidade se tornem mais evidentes.

A análise dos relatórios de sustentabilidade das empresas estudadas permite-os afirmar que, independente do setor industrial, verifica-se investimentos para o desenvolvimento de sistemas de energia sustentáveis. Ressalta-se, entretanto, que cada uma delas apresenta modelos energéticos com ênfases distintas podendo ser: segurança energética, controle de impacto ambiental, eficiência energética ou uma matriz ambiental limpa, isto é, insumos e produtos ambientalmente corretos.

A coleta de dados acerca da sustentabilidade energética industrial a partir de relatórios de sustentabilidade é uma das limitações do presente trabalho, tendo em vista a ausência de um sistema teórico conceitual que reflita as interações entre a empresa e o meio ambiente no sistema total. A ausência de um padrão de apresentação das informações, algumas inclusive sem qualquer tipo de mensuração, exigiu a definição de escalas de avaliação quali-quantitativas para determinação do índice de sustentabilidade energética industrial. Destacam-se assim, possíveis problemas de julgamentos de valor que estão sempre presentes em sistemas de avaliação, quer de maneira implícita ou explícita. No caso dos dados quantitativos destaca-se ainda o risco de comparações quantitativas equivocadas, em face da possibilidade de adoção de metodologias distintas pelas empresas na quantificação dos dados.

Apesar das limitações impostas pela referência bibliográfica adotada para coleta de dados, o índice apresentado neste trabalho pretende uma avaliação quali-quantitativa das iniciativas empresariais em direção a sustentabilidade energética. Consideram-se como funções do índice de sustentabilidade energética industrial aquelas apresentadas por Tunstall (1994), *apud* Bellen (2007), que incluem comparações entre situações e empresas, incluindo avaliação de tendências em relação às metas e objetivos. Acrescenta-se a isso, a provisão de informações de advertência e antecipação de condições futuras dos modelos energéticos das empresas.

Os indicadores de sustentabilidade energética industrial são apresentados em gráfico tipo radar, cuja área do polígono formado é numericamente igual ao índice de Sustentabilidade Energética Industrial - SEI - da empresa analisada. Assim, é possível a avaliação do grau de sustentabilidade energética industrial dos estudos de caso apresentados. A equivalência do índice SEI com a representação gráfica dos indicadores permite a visualização imediata de ameaças e oportunidades dos modelos energéticos adotados pelas empresas.

Nas Tabelas 6 a 9 apresenta-se uma síntese das iniciativas das empresas referentes a cada um dos indicadores, incluindo os valores considerados em função do estágio atual das iniciativas de autogeração de energia e difusão de energias renováveis na matriz energética, além das medidas de eficiência energética e controle de emissões.

De uma maneira geral, a participação das fontes renováveis na matriz industrial ainda é pouco expressiva, com exceção da ARACRUZ CELULOSE, que conta com vantagens intrínsecas ao seu processo industrial. Nas demais empresas, vêm sendo realizadas pesquisas para desenvolvimento tecnológico com vistas à substituição dos combustíveis fósseis, com ênfase na biomassa. Exceção a essa regra é a ALCOA, que investe na geração de energia elétrica a partir de fontes hidráulicas.

TABELA 7- AVALIAÇÃO DO INDICADOR DIFUSÃO ENERGIAS RENOVÁVEIS

Item	Empresa	Síntese do Diagnóstico	Peso
1	ALCOA ALUMÍNIO	<ul style="list-style-type: none">○ Toda a energia elétrica consumida é proveniente de fontes renováveis, mais especificamente de hidrelétricas.○ Apresenta algumas iniciativas de substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis, tais como a utilização do biodiesel nos fornos de cozimento e em veículos.	4
2	ARACRUZ CELULOSE	<ul style="list-style-type: none">○ Nas unidades de celulose, a participação de energias renováveis (biomassa e lixo) na matriz energética é bastante expressiva, superior a 90%.○ Nas unidades de papel a participação de energias renováveis é cerca de 50%.	4
3	ARCELOR MITTAL	<ul style="list-style-type: none">○ Unidades industriais com participação expressiva de carvão mineral como insumos na matriz energética superior a 90%.○ Apresenta iniciativas de utilização do carvão vegetal para alimentação de altos-fornos.	1
4	HOLCIM BRASIL	<ul style="list-style-type: none">○ A empresa apresenta algumas iniciativas de utilização de biomassa (moimha de carvão vegetal)	1
5	SUZANO PETROQUÍMICA	<ul style="list-style-type: none">○ A empresa apresenta pesquisas ainda incipientes para utilização de biomassa na produção de polímeros verdes	1

Fonte: Elaboração própria.

Tendo em vista a importância dos insumos energéticos para a competitividade das empresas, observa-se uma tendência de investimentos em autogeração de energia nas empresas estudadas, com exceção da SUZANO PETROQUÍMICA. Em alguns casos, isso vem acompanhado da difusão de energias renováveis, tal como nos casos da ALCOA e da ARACRUZ CELULOSE. No primeiro caso, verifica-se alto investimento em hidreletricidade, enquanto no último, temos a utilização de resíduos do próprio processo industrial. De maneira distinta, os processos de autogeração da HOLCIM e da ARCELOR MITTAL ainda são fortemente dependentes de combustíveis fósseis.

TABELA 8 - AVALIAÇÃO DO INDICADOR AUTOGERAÇÃO DE ENERGIA

Item	Empresa	Síntese do Diagnóstico	Peso
1	ALCOA ALUMÍNIO	<ul style="list-style-type: none">○ Participação em consórcios na construção de hidrelétricas propiciou em 2006 uma autoprodução de cerca de 40%.○ Existem perspectivas para o ano 2011 de incremento da autogeração de energia em 30 pontos percentuais em relação ao total de 2006.	2
2	ARACRUZ CELULOSE	<ul style="list-style-type: none">○ Autogeração de energia aproveita resíduos do próprio processo industrial.○ As unidades de produção de celulose são praticamente auto-suficientes na geração de energia, aproximadamente 99% de autogeração. <p>As unidades produção de papel têm um potencial de autogeração de 75%.</p>	4
3	ARCELOR MITTAL	<ul style="list-style-type: none">○ O modelo de segurança energética da empresa já conta com autogeração de 95%, com perspectivas de venda de excedentes significativa.	4
4	HOLCIM BRASIL	<ul style="list-style-type: none">○ Toda a energia elétrica consumida da matriz energética é fornecida pelas concessionárias locais. O co-processamento de resíduos é uma alternativa para autogeração de energia térmica.	3
5	SUZANO PETROQUÍMICA	<ul style="list-style-type: none">○ Toda a energia elétrica consumida é fornecida por concessionárias públicas, empresas próximas que geram excedentes e centrais de utilidades dos pólos petroquímicos onde estão situadas.○ O vapor é gerado em caldeiras próprias ou comprado de empresas vizinhas.	1

Fonte: Elaboração própria.

A difusão de energias renováveis na matriz energética industrial também traz benefícios para o controle de emissões atmosféricas, permitindo tanto a adequação à legislação local, quanto ao atendimento às metas dos próprios grupos industriais. Destaca-se, nesse sentido, a atuação da ALCOA e da ARACRUZ CELULOSE. No caso da HOLCIM, a natureza tóxica dos resíduos utilizados como combustíveis alternativos exigiu da empresa grandes investimentos tecnológicos para o controle de emissões.

Altamente dependentes de combustíveis fósseis, a SUZANO PETROQUÍMICA e a ARCELOR MITTAL apresentam-se em estágios bem diferentes sob o ponto de vista de controle de emissões. A SUZANO PETROQUÍMICA ainda está em fase de busca de novas tecnologias para controle de emissões e adequação à legislação ambiental, enquanto a ARCELOR MITTAL, já apresenta projetos implantados com resultados positivos.

TABELA 9 - AVALIAÇÃO DO INDICADOR CONTROLE DE EMISSÕES

Item	Empresa	Síntese do Diagnóstico	Peso
1	ALCOA ALUMÍNIO	<ul style="list-style-type: none"> ○ Investimento em energias renováveis como estratégia de autogeração e controle de emissões. ○ Meta de redução em 25% das emissões de CO₂ atendida em 2004. ○ Identificação do potencial de venda de créditos de carbono. 	4
2	ARACRUZ CELULOSE	<ul style="list-style-type: none"> ○ Apresenta inventário de emissões, com reduções quantificadas. 	4
3	ARCELOR MITTAL	<ul style="list-style-type: none"> ○ Implantação de três projetos de mecanismos de desenvolvimento limpo, com perspectivas de obtenção de crédito de carbono. 	3
4	HOLCIM BRASIL	<ul style="list-style-type: none"> ○ Controle de emissões realizado através da introdução de matéria-prima alternativa na composição do produto. ○ Meta de CO₂ atingida e emissões de SO₂ atendem à legislação vigente. 	5
5	SUZANO PETROQUÍMICA	<ul style="list-style-type: none"> ○ Inventários de emissões realizados. ○ Infração à legislação ambiental; ○ Estudo de alternativas de controle das emissões. 	2

Fonte: Elaboração própria.

De acordo com dados do MME (2007), observa-se que o consumo de eletricidade no setor industrial brasileiro vem crescendo a taxas bem menores do que o consumo total. Entretanto, as empresas não têm explorado medidas de eficiência energética em seus relatórios de sustentabilidade, apesar de relatarem a existência de programas de conservação de energia. Nesses relatórios, dados quantitativos referem-se principalmente à redução de emissões e potencial de autogeração. Apesar de não ser uma alternativa para economia de eletricidade, a cogeração

apresenta-se como estratégia para economia global de energia, além de aproveitar resíduos dos processos industriais.

TABELA 10 - AVALIAÇÃO DO INDICADOR RACIONALIZAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA

Item	Empresa	Síntese do Diagnóstico	Peso
1	ALCOA ALUMÍNIO	<ul style="list-style-type: none"> ○ Apresenta inventário de consumo de energia e monitoramento periódico de indicadores de redução de consumo de energia. ○ Algumas iniciativas de redução de consumo implantadas com sucesso. Consumo específico inferior a média internacional. 	4
2	ARACRUZ CELULOSE	<ul style="list-style-type: none"> ○ Apresenta inventário de consumo de energia e monitoramento periódico de indicadores de redução de consumo de energia. ○ Considera como medidas de eficiência energética a utilização de recursos renováveis e autogeração de energia. 	2
3	ARCELOR MITTAL	<ul style="list-style-type: none"> ○ Possui Programa de Conservação de Energia. ○ Projetos de eficiência energética em fase de implantação. 	3
4	HOLCIM BRASIL	<ul style="list-style-type: none"> ○ Apresenta medidas para eficiência térmica, mais especificamente o co-processamento de resíduos. ○ O co-processamento é apresentado como alternativa de racionalização de consumo de combustíveis não renováveis. 	2
5	SUZANO PETROQUÍMICA	<ul style="list-style-type: none"> ○ Possui programa de conservação de energia; ○ Projetos de redução do consumo de energia em fase de implantação; ○ Algumas ações de redução de consumo de energia já foram implantadas e quantificadas. 	4

Fonte: Elaboração própria.

O modelo de sustentabilidade energética da empresa ALCOA segue a tendência das indústrias de alumínio no país que é de investimentos em autogeração a partir da participação em consórcios de usinas hidrelétricas. Em termos quantitativos, o índice SEI da empresa ALCOA para o ano de 2006 equivale a 48% (FIGURA 69). Assim, temos a sustentabilidade energética baixa, tendendo a moderada. As previsões de autogeração para 2011 permitem um índice SEI de 56%, efetivando a classificação do nível de sustentabilidade energética como moderada. Observa-se assim, que os resultados alcançados em termos de controle de impacto ambiental e obtenção de uma matriz limpa são mais expressivos do que aqueles de segurança energética. De maneira distinta de outros setores, a geração de energia internamente às unidades industriais coloca-se como um desafio para a indústria de alumínio, já que seu processo produtivo não apresenta abundância na geração de resíduos com potencial energético.

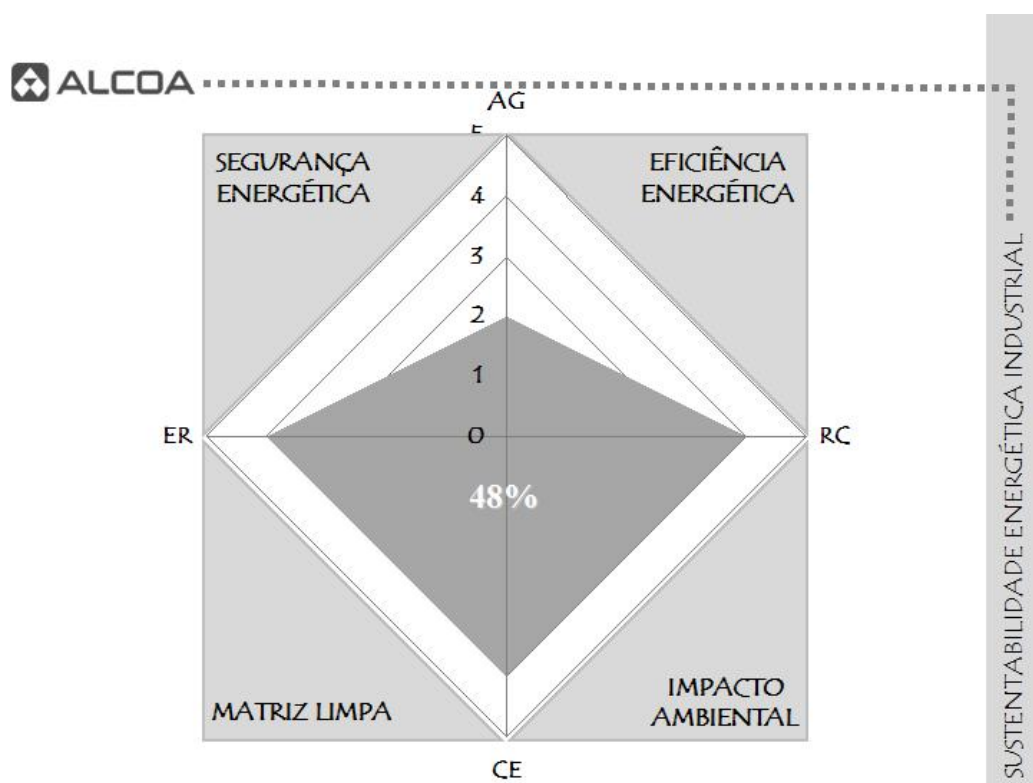


FIGURA 69 - SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL DA ALCOA.

Fonte: Elaboração própria.

O resultado do índice SEI para a empresa HOLCIM, 18%, classifica o estágio atual de sustentabilidade energética da empresa em muito baixa. Pela Figura 70 verifica-se um desequilíbrio do modelo energético da empresa, que privilegia a autogeração e controle de emissões em detrimento à difusão de energias renováveis e à racionalização de consumo. Assim, todas as esferas da sustentabilidade energética ainda apresentam um amplo potencial de desenvolvimento.

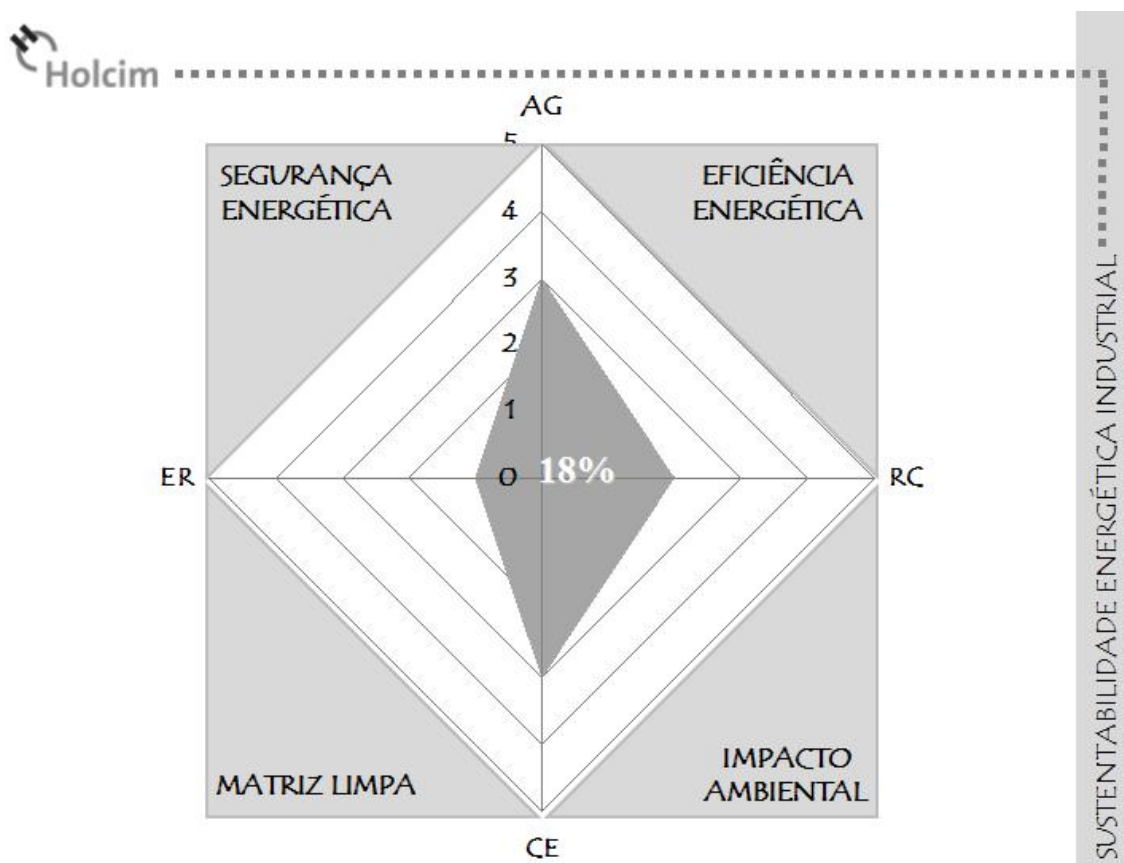


FIGURA 70 - SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL DA HOLCIM.

Fonte: Elaboração própria.

Já no caso da empresa ARACRUZ CELULOSE, a natureza sustentável intrínseca ao processo produtivo privilegia a segurança energética e a obtenção de uma matriz de recursos limpa. Entretanto, a falta de iniciativas de racionalização de consumo de energia prejudica o potencial de sustentabilidade energética da empresa, que ainda apresenta nível baixo, índice SEI igual a 48% (FIGURA 71). Uma justificativa possível para isso é o fato da empresa ser responsável pela geração da maior parte de sua energia térmica. Ressalta-se nesse caso a interface entre os indicadores de difusão de energias renováveis, de controle de emissões e de autogeração de energia.

Bossel (1998), apud Bellen (2007), afirma que só existe uma alternativa a sustentabilidade, que é a insustentabilidade. Assim, para atingir o progresso em direção a sustentabilidade energética, cada uma das esferas deve ser desenvolvida de maneira equilibrada.

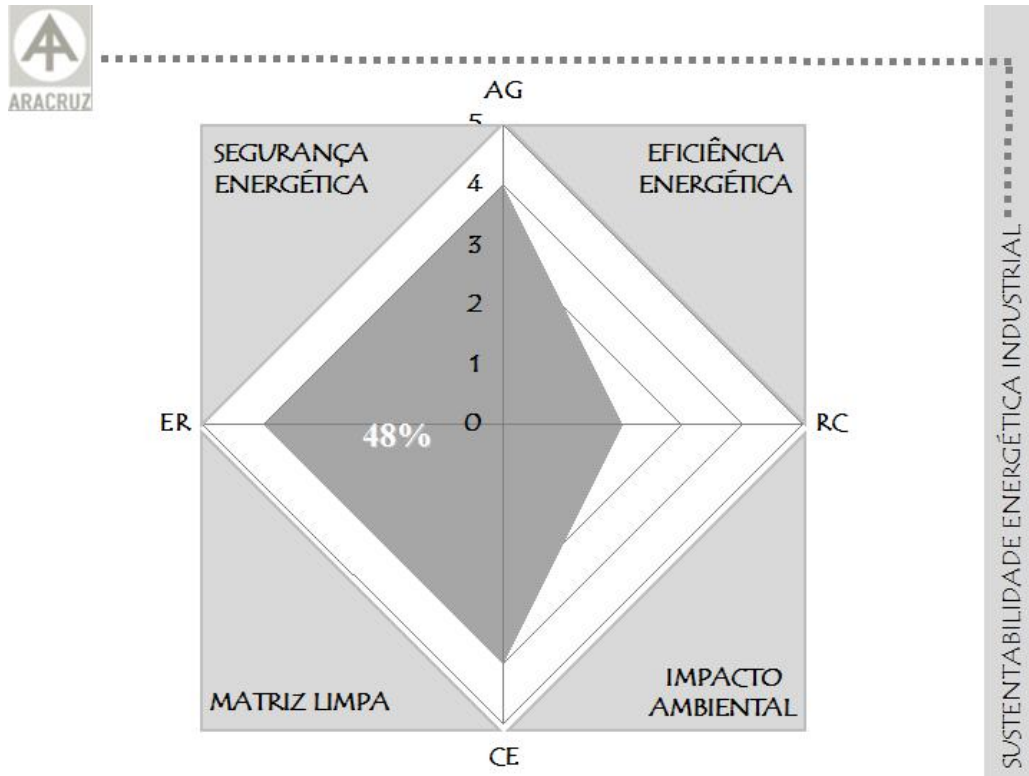


FIGURA 71 - SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL DA ARACRUZ CELULOSE.

Fonte: Elaboração própria.

A forte dependência do insumo eletricidade faz com que as iniciativas da empresa SUZANO PETROQUIMICA sejam direcionada à racionalização do consumo, sendo os investimentos em energias renováveis, autogeração e controle de emissões bastante deficiente. Assim, pode-se classificar a sustentabilidade energética desta empresa como muito baixa, já que o índice SEI quantificado foi de 15% (FIGURA 72). De maneira semelhante à empresa HOLCIM, a SUZANO PETROQUIMICA ainda apresentam um amplo potencial para exploração da sustentabilidade energética em todas as suas esferas.

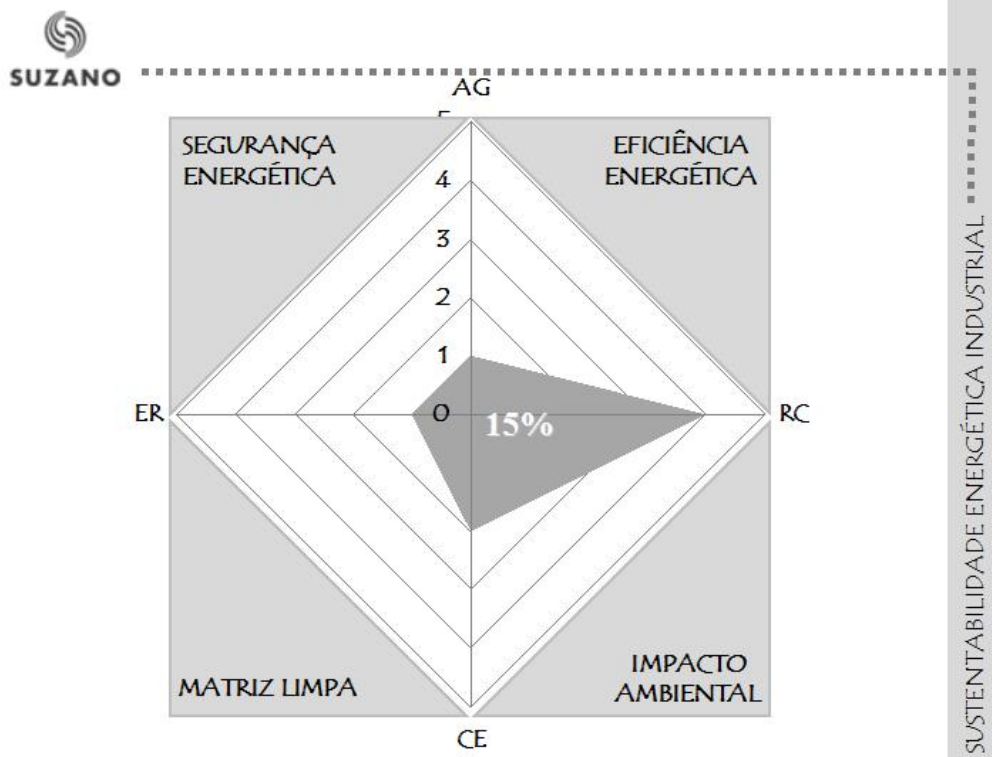


FIGURA 72 – SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL DA SUZANO PETROQUÍMICA.

Fonte: Elaboração própria.

O diagnóstico da sustentabilidade energética da empresa ARCELOR MITTAL enfatiza a autogeração, sendo o controle de emissões e racionalização de consumo conseqüências diretas do modelo de segurança energética desenvolvido pela empresa. Assim, as deficiências em termos de difusão das energias renováveis na matriz energética da empresa prejudicam o nível de sustentabilidade energética da mesma, que para 2006 foi de 28% (FIGURA 73). A concretização das previsões de autosuficiência na geração de energia para o ano de 2007 propiciou um incremento do índice SEI, que seria então de 32%, sem reflexos, entretanto, na classificação da sustentabilidade energética industrial.

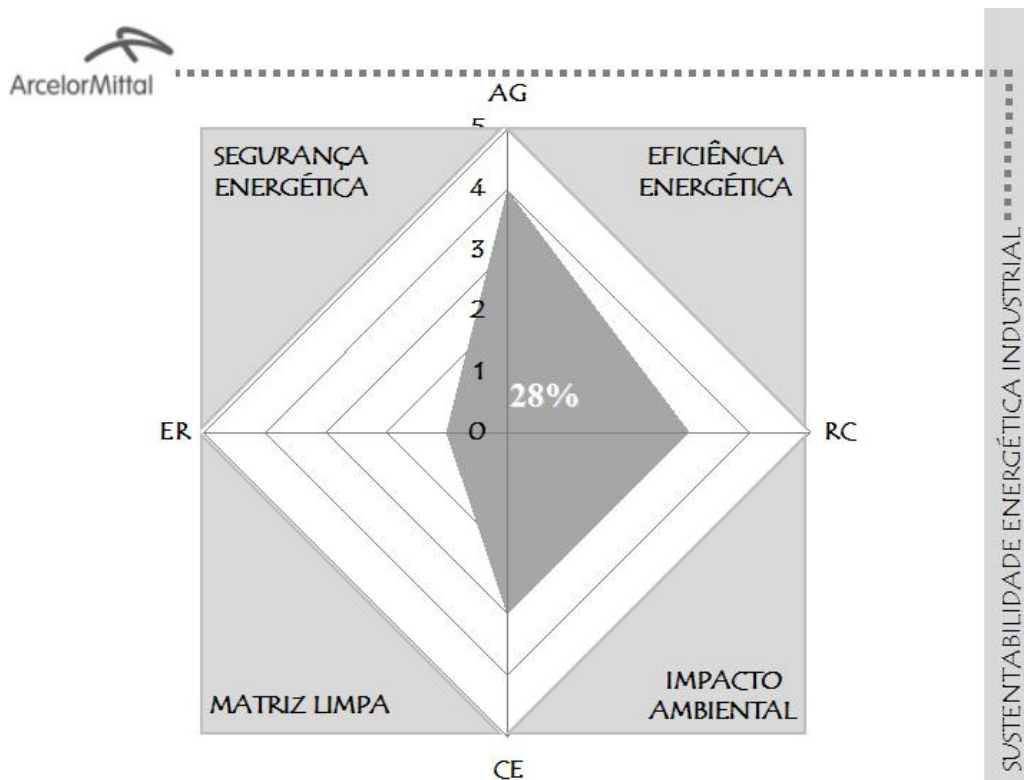


FIGURA 73 – SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA INDUSTRIAL DA ARCELOR MITTAL.

Fonte: Elaboração própria.

A análise comparativa entre os resultados obtidos nos estudos de casos e aqueles para os sub-setores industriais permite a constatação de similaridades. Assim, os resultados obtidos para as empresas podem ser extrapolados para os respectivos sub-setores com ressalvas principalmente em termos dos indicadores de autogeração de energia e controle de emissões atmosféricas. A quantificação do índice de sustentabilidade energética industrial para os sub-setores está vinculada à divulgação dos dados setoriais relativos ao inventário de emissões atmosféricas, visto que os demais podem ser obtidos nos balanços de energia publicados periodicamente pelo MME.

Finalizando, as ferramentas para avaliação de ciclo de vida (ACV), tal como o *software Umberto®*, parecem atender às exigências de padronização dos dados para quantificação do índice de sustentabilidade energética industrial. Para tanto, esse software realiza análises de fluxo de materiais e energia, em metodologias denominadas *from gate to gate*. Temos, portanto, como sugestão para trabalhos futuros a avaliação da aplicabilidade dessas ferramentas de ACV na definição de um padrão de apresentação dos resultados quantitativos divulgados nos relatórios de

sustentabilidade empresariais, com vistas à comparação entre empresas e unidades de diferentes sub-setores industriais. (Figura 74)

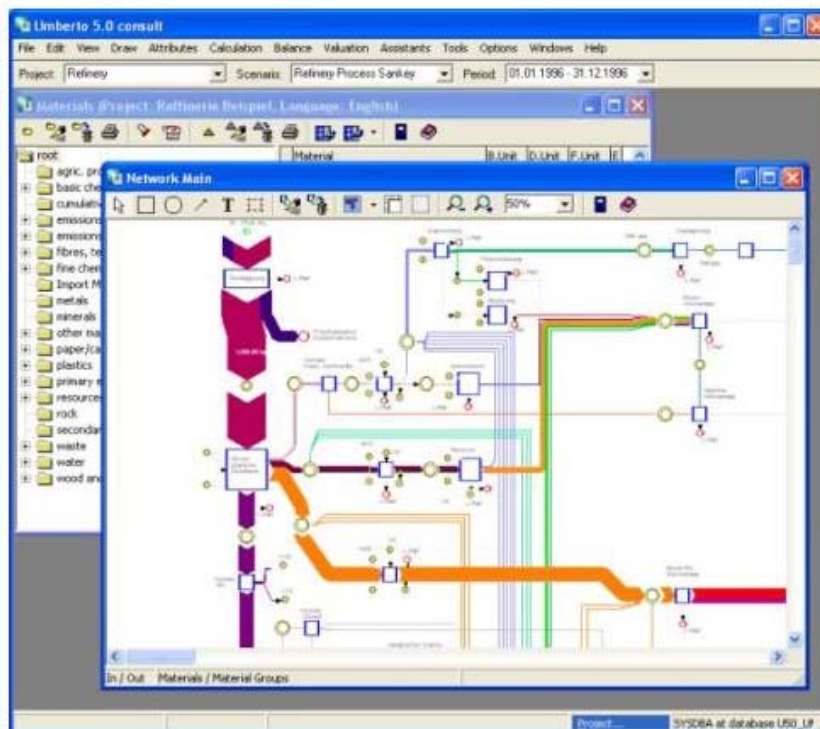


FIGURA 74 – AVALIAÇÃO DE FLUXO DE MATERIAIS E ENERGIA NO SOFTWARE UMBERTO®

Fonte: Disponível em <www.ifu.com.> Acesso em 29 jun. 2008.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A introdução de considerações energéticas no conceito de desenvolvimento sustentável a partir do Protocolo de Quioto foi considerada como marco teórico para o presente trabalho. O cenário de disparidade entre oferta e demanda de eletricidade, incluindo as restrições impostas ao crescimento do setor industrial brasileiro, devido ao racionamento de energia ocorrido em 2001, justifica o estudo da sustentabilidade energética industrial. Em resposta a essa crise energética, modelos de desenvolvimento de sistemas de energia sustentáveis vêm sendo adotados por empresas do setor industrial brasileiro. A intensificação da eficiência energética e da co-geração de energia, o aumento da participação das fontes alternativas na matriz energética, com ênfase nas energias renováveis, bem como a fixação de dióxido de carbono, apresentam-se como estratégias complementares na busca do desenvolvimento sustentável em nível energético.

Assim, entende-se por sustentabilidade energética industrial a exploração da capacidade empresarial de utilização do potencial energético encontrado nos ecossistemas, ao mesmo tempo em que se mantém a deterioração ambiental em um nível mínimo. Indicadores energéticos derivados de bases pré-existentes permitem a mensuração do índice de sustentabilidade energética industrial, que inclui dimensões relativas à segurança energética, controle de impacto ambiental, matriz energética limpa e eficiência energética. É interessante destacar que esse índice pode ser aplicado para uma unidade industrial, grupo de empresas ou mesmo extrapolado para os segmentos que compõem o setor industrial.

Neste trabalho foram apresentados estudos de casos de empresas de grande representatividade nos segmentos industriais, que respondem por quase metade de toda a demanda industrial por energia elétrica, sendo estes os segmentos: alumínio, cimento, papel e celulose, petroquímica e siderurgia. Assim, os diagnósticos da sustentabilidade energética industrial foram realizados a partir de dados das empresas: Alcoa Alumínio, Holcim Brasil, Aracruz Celulose, Suzano Petroquímica e Arcelor Mittal.

A determinação de pesos associados aos indicadores consistiu numa estratégia para quantificação e uniformização das informações apresentadas nos relatórios de sustentabilidade que são publicados pelas empresas analisadas. Algumas limitações poderiam ser superadas a partir da utilização de modelos padronizados de balanço de energia, que permitem a quantificação dos fluxos de massa e energia envolvidos nos processos industriais, sejam eles insumos (materiais e energéticos), ou produtos (resíduos sólidos, efluentes, emissões atmosféricas e energéticos). Apesar da existência de diversas iniciativas em direção a sistemas de energia sustentáveis, a análise crítica dos modelos de planejamento energético adotados pelas empresas analisadas sugere que a sustentabilidade energética industrial ainda é um grande desafio, principalmente em termos de energias renováveis e eficiência energética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (BRASIL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2002. 199p. Disponível em <www.aneel.gov.br> Acesso em 30 out. 2007.
- [2] ALCOA (2002) **Relatório de Sustentabilidade**. [S.l.]: ALCOA, 12 p. Disponível em <www.alcoa.com.br> Acesso em 26 maio 2008.
- [3] ALCOA (2004) **Relatório de Sustentabilidade**. [S.l.]: ALCOA, 86 p. Disponível em <www.alcoa.com.br> Acesso em 26 maio 2008.
- [4] ALCOA (2007) **Relatório de Sustentabilidade** [S.l.]: ALCOA, 104 p. Disponível em <www.alcoa.com.br> Acesso em 29 nov. 2007.
- [5] ARACRUZ CELULOSE. **Relatório Anual e de Sustentabilidade**. São Paulo: ARACRUZ CELULOSE. 2006. 99p. Disponível em <www.aracruz.com.br> Acesso em 29 nov. 2007
- [6] ARCELOR MITTAL. **Relatório de Sustentabilidade**. Belo Horizonte: ARCELOR MITTAL, 2005. 67p. Disponível em <www.arcelor.com.br> Acesso em 29 nov. 2007
- [7] ARCELOR MITTAL. **Co-geração de energia elétrica com recuperação de Gás LD**. Tubarão: ARCELOR MITTAL, 2007. 20p. Disponível em <www.mapfre.com.br> Acesso em 11 mar. 2008
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (ABAL). **Relatório de Sustentabilidade da indústria de alumínio**. São Paulo: Editora ABAL [s.d.] 56 p. Disponível em <www.abal.org.br> Acesso em 29 nov. 2007.
- [9] BELLEN, H.M.V. **Indicadores de Sustentabilidade: uma análise comparativa**. São Paulo: Editora FGV, 2005, 253 p.
- [10] BRASKEM. **Relatório de Sustentabilidade Empresarial**. [S.l.]: BRASKEM, 2006 56p Disponível em <www.braskem.com.br> Acesso em 29 nov. 2007
- [11] CAPRIGLIONE, P.S. **A energia renovável na matriz energética brasileira**. 2006, 106 p. Dissertação (Mestrado em Finanças e Economia Empresarial – Fundação Getúlio Vargas, São Paulo. Disponível em <www.eesp.fgv.br> Acesso em 8 fev. 2008.
- [12] CARPIO, R.C. **Otimização no co-processamento de resíduos na indústria de cimento envolvendo custos, qualidade e impacto ambiental**. 2005. 194 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. Disponível em <www.unifei.edu.br> Acesso em 19 mar. 2008.
- [13] CENCIG, M.O. **Indicadores energético-ambientais**. [S.l.] [Sn] 2002. 7 p. Disponível em <www.feagri.unicamp.br> Acesso em 25 nov. 2007.
- [14] CIMA, F.M. **Utilização de indicadores energéticos no planejamento energético integrado**. 2006. 208 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em <www.ppe.ufrj.br> Acesso em 25 nov. 2007.
- [15] COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (COPEL). **Curso de capacitação de multiplicadores em eficiência energética: setor rural e agroindustrial**. Paraná: COPEL. 2004. 58 p. Disponível em <www.copel.com> Acesso em 29 jun. 2007.
- [16] COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (COPEL). **Manual de eficiência energética na indústria**. Curitiba: Editora COPEL, 2005. 155 p. Disponível em <www.copel.com> Acesso em 19 out. 2007.
- [17] COMPANHIA SIDERÚRGIA TUBARÃO (CST). **Co-Geração de Energia Elétrica através da recuperação de LDG**. [S. l.]: CST, 2005. 55 p. Disponível em <www.mct.gov.br> Acesso em 11 mar. 2008.
- [18] COSTA, M.M **Princípios de ecologia industrial aplicados a sustentabilidade ambiental e aos sistemas de produção de aço**. 2002. 271 p. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em <www.ppe.ufrj.br> Acesso em 27 nov. 2007.

- [19] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE) **Consumo Industrial**. [S.l.]: EPE, 2005. 51 p. Disponível em <www.epe.gov.br> Acesso em 15 abr. 2008.
- [20] GELLER, H. (2003) **Revolução Energética: Política para um Futuro Sustentável**. Rio de Janeiro: Editora Relume Dumará, 2003, 200p.
- [21] GEROSA, T.M. **O estudo da utilização do gás natural como insumo para a indústria química e petroquímica: modelagem de uma planta gás-química**. 2007. 155 p. Dissertação (Mestrado em Energia). Universidade de São Paulo, São Paulo. <www.teses.usp.br> Acesso em 17 out. 2007.
- [22] HOLCIM BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2003**. [S.l.]: HOLCIM, 2003. 58 p. Disponível em <www.holcim.com.br> Acesso em 10 abr. 2008.
- [23] HOLCIM BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2005**. [S.l.]: HOLCIM, 2005. 58 p. Disponível em <www.holcim.com.br> Acesso em 10 abr. 2008.
- [24] MACHADO, F.V. Indicador de Sustentabilidade Energética: Um modelo de avaliação para a governança regulatória. In: ENCONTRO DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM AMBIENTE E SOCIEDADE, III, 2006, Brasília. **Anais do III Encontro da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade – ANPPAS**, 2006. 16p. Disponível em <www.anppas.org.br> Acesso em 25 nov. 2007.
- [25] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balço de Energia Útil 2005**. Brasília: MME, 2005. Disponível em <www.mme.gov.br> Acesso em 8 fev. 2008.
- [26] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balço Energético Nacional 2007**. Brasília: MME, 2007 Disponível em <www.mme.gov.br> Acesso em 8 fev. 2008.
- [27] PIOTTO, Z.C. **Eco-eficiência na indústria de papel e celulose – Estudo de caso**. 2003. 379 p. Tese (Doutorado em Engenharia) Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em <www.teclim.ufba.br> Acesso em 14 fev. 2008.
- [28] TORRES, V.N. GAMA, C.D. **Índice de sustentabilidade ambiental de obras geotécnicas**. [S.l.]: [S.n.], 2006. 10 p. Disponível em <cegeo.ist.utl.pt> Acesso em 27 mai. 2008.
- [29] SANTI, A.M.M. **Co-incineração e co-processamento de resíduos industriais perigosos em fornos de clínquer: investigação no maior pólo de cimento do país, região metropolitana de Belo Horizonte, MG, sobre os riscos ambientais e propostas para a segurança química**. 2003. 249 p. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Disponível em <libdigi.unicamp.br> Acesso em 4 abr. 2008.
- [30] SANTI, A.M.M. FILHO, A.O.S. Combustíveis e riscos ambientais na fabricação de cimento: casos na região do calcário ao norte de Belo Horizonte e possíveis generalizações. In: ENCONTRO DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM AMBIENTE E SOCIEDADE, II, 2004, Campinas. **Anais do II Encontro da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade – ANPPAS**, 2004. 18p. Disponível em <www.bvsde.paho.org> Acesso em 6 fev. 2008.
- [31] SANTOS *et al.* O uso de energia oriunda de fontes renováveis nas indústrias brasileiras: uma questão de sustentabilidade. In: Simpósio de Engenharia de Produção, XIII, 2006, Bauru. **Anais do XIII Simpósio de Engenharia de Produção - SIMPEP**, 2006. 12p. Disponível em <www.simpep.feb.unesp.br> Acesso em 4 set. 2007.
- [32] SCARPINELLA, G.A. **Reflorestamento no Brasil e o Protocolo de Quioto**. 2002. 182 p. Dissertação (Mestrado em Energia) Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em <www.iee.usp.br> Acesso em 6 fev. 2008.
- [33] SCHUCHARDT *et al* **A indústria petroquímica no próximo século: como substituir o petróleo como matéria-prima?** In: Química Nova, Vol. 24, No. 2, 247-251, 2001. Disponível em <www.scielo.br> Acesso em 18 jul. 2006.

- [34] SILVA, G.C. **A eficiência energética e o panorama brasileiro: onde encontrar soluções para a crise de energia?** 2005. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. Disponível em <www.ufsm.br> Acesso em 18 jul.2006.
- [35] SILVA, J.C.T. **A gestão da tecnologia nas empresas e interfaces com a gestão ambiental e gestão energética.** [S.l.]: Editora UNESP, 2005. 63 p. Disponível em: <pee.mdic.gov.br> Acesso em 18 jul. 2006.
- [36] STRAPASSON, A.B. **A energia térmica e o paradoxo da eficiência energética: desafios para um novo modelo de planejamento energético.** 2004. 133 p. Dissertação (Mestrado em Energia) Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em < www.iee.usp.br> Acesso em 6 fev. 2008.
- [37] SUZANO PETROQUIMICA **Relatório anual de sustentabilidade.** São Paulo, SUZANO PETROQUIMICA, 2007. 138 p. Disponível em < www.suzanopetroquimica.com.br > Acesso em 29 nov. 2007.
- [38] VELÁZQUEZ, S.M.S.G. **A cogeração de energia no segmento de papel e celulose: contribuição a matriz energética do Brasil.** 2000. 205 p. Dissertação (Mestrado em Energia) Universidade de São Paulo, São Paulo Disponível em < www.iee.usp.br> Acesso em 6 fev. 2008.
- [39] VELÁZQUEZ, S.M.S.G. **Perspectivas para a geração de excedentes de energia elétrica nos segmento de papel e celulose com a utilização de sistemas de gaseificação/turbina a gás.** 2006. 263 p. Tese (Doutorado em Energia) Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em < www.iee.usp.br > Acesso em 4 set.2007.
- [40] WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **Iniciativas para a sustentabilidade do cimento.** [S.l.]: WBCSD, 2002. 6 p. Disponível em <www.wbcsd.org> Acesso em 14 fev. 2008.
- [41] ZANONI, C. **Análise exérgica de um forno elétrico a arco.** 2004. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em <www.pucrs.br> Acesso em 28 nov. 2007.

ANEXO A
TERMO DE AUTORIA
DECLARAÇÃO

Eu, **Marcela Álvares Maciel**, estudante do curso de pós-graduação *Latu Sensu* da UFLA, com número de matrícula 107038 no curso de FAE – Formas Alternativas de Energia, declaro, para devidos fins e efeitos, e para fazer prova junto à Pró-Reitoria de Pós-Graduação da Universidade Federal de Lavras, que, sob as penalidades previstas no art. 299 do Código Penal Brasileiro, que é de minha criação o trabalho de monografia que ora apresento, conforme exigência expressa no parágrafo único do art. 11 da Resolução nº1, de 3 de abril de 2001, da Câmara de Educação Superior do Conselho Nacional de Educação.

Art. 299 do Código Penal Brasileiro, que dispõe sobre o crime de *Falsidade Ideológica*:

"Omitir, em documento público ou particular, declaração que dele devia constar, ou nele inserir ou fazer inserir declaração falsa ou diversa da que devia estar escrita, com o fim de prejudicar direito, criar obrigação ou alterar verdade sobre fato juridicamente relevante:

Pena - reclusão, de 1 (um) a 5 (cinco) anos, e multa, se o documento é público, e reclusão de 1 (um) a 3 (três) anos, e multa, se o documento é particular.

Parágrafo único. Se o agente é funcionário público, e comete o crime prevalecendo-se do cargo, ou se a falsificação ou alteração é de assentamento de registro civil, aumenta-se a pena de sexta parte". Este crime engloba plágio e compra fraudulenta de documentos científicos.

Por ser verdade, e por ter ciência do referido artigo, firmo a presente declaração.

Belo Horizonte, 30 de junho de 2008.

Marcela Álvares Maciel

ANEXO B

REVISÃO DO TEXTO

DECLARAÇÃO

Eu, **Lúcio Coelho Costa**, professor de Português no Estado de Minas Gerais, portador do registro de magistério nº 1054611-7 do estado de Minas Gerais declaro, para os devidos fins e efeitos, e para fazer prova junto à Pró-Reitoria de Pós-Graduação da Universidade Federal de Lavras, que fiz a revisão de texto da Monografia intitulada *Sustentabilidade Energética Industrial* de autoria de Marcela Álvares Maciel.

Por ser verdade, firmo a presente declaração.

Belo Horizonte, 30 de junho de 2008.

Lúcio Coelho Costa