

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Análise de Ciclo de Vida Aplicada ao Processo
Produtivo de Cerâmica Estrutural Tendo
Como Insumo Energético Capim Elefante
(*Pennisetum Purpureum Schaum*)**

Autor: **Omar Seye**

Orientador: **Luís Augusto Barbosa Cortez**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS**

**Análise de Ciclo de Vida Aplicada ao Processo
Produtivo de Cerâmica Estrutural Tendo
Como Insumo Energético Capim Elefante
(*Pennisetum Purpureum Schaum*)**

Autor: **Omar Seye**

Orientador: **Luís Augusto Barbosa Cortez**

Curso: em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Tese de doutorado apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Campinas, 2003
S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Se93a Seye, Omar
Análise de ciclo de vida aplicada ao processo produtivo de cerâmica estrutural tendo como insumo energético capim elefante (*Pennisetum Purpureum Schaum*) / Omar Seye.-- Campinas, SP: [s.n.], 2003.

Orientador: Luís Augusto Barbosa Cortez
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Capim – elefante. 2. Cerâmica – Indústria – Meio ambiente. 3. Meio ambiente – Desenvolvimento sustentável. I. Cortez, Luís Augusto Barbosa. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Titulo em Inglês: Life cycle assessment applied to the productive process of structural ceramic tends as input energy elephant grass (*Pennisetum Purpureum Schaum*)

Palavras-chave em Inglês: Life cycle assessment, Elephant grass, Ceramics industry, Environment, Sustainable development

Área de concentração:

Titulação: Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos

Banca examinadora: Carlos Alberto Luengo, Electo Eduardo Silva Lora, Guilherme Bezzon, José Dílcio Rocha

Data da defesa: 22/10/2003

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS**

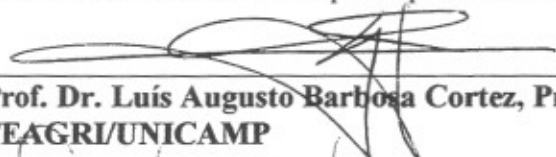
TESE DE DOUTORADO

**Análise de Ciclo de Vida Aplicada ao Processo
Produtivo de Cerâmica Estrutural Tendo
Como Insumo Energético Capim Elefante
(*Pennisetum Purpureum Schaum*)**

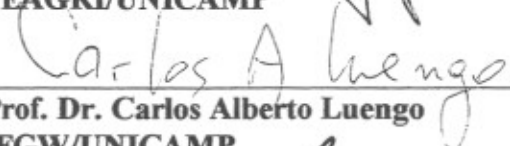
Autor: **Omar Seye**

Orientador: **Luís Augusto Barbosa Cortez**

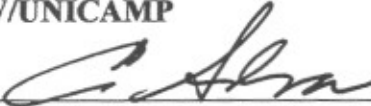
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:



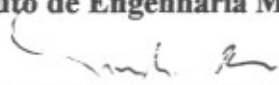
**Prof. Dr. Luís Augusto Barbosa Cortez, Presidente
FEAGRI/UNICAMP**



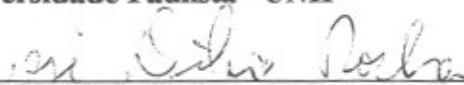
**Prof. Dr. Carlos Alberto Luengo
IFGW/UNICAMP**



**Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora
Instituto de Engenharia Mecânica - DEM / UNIFEI**



**Prof. Dr. Guilherme Bezzon
Universidade Paulista - UNIP**



**Dr. José Dílzio Rocha
Bioware Tecnologias de Termoconversão de Biomassa**

Campinas, 22 outubro de 2003.

Dedicatória:

A todos que influenciaram em minha formação social e acadêmica,

em especial à minha esposa, *Astou N'diaye Diaw*

e meus filhos *Makha Seye* e *Issaka Diaw Seye*

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Aos meus pais, pelo incentivo em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador, que me mostrou os caminhos a serem seguidos.

A todos os professores, colegas e funcionários que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

*«Aux âmes bien nées la valeur n'attend
point le nombre des années»*

Resumo

Seye, Omar, *Análise de Ciclo de Vida Aplicada ao Processo Produtivo de Cerâmica Estrutural tendo como Insumo Energético Capim Elefante (Pennisetum Purpureum Schaum)*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 147 p. Tese (Doutorado)

Para alcançar o desenvolvimento sustentável a energia tem um papel chave, sendo responsável por boa parte da poluição em todas as atividades humanas. O uso de energias renováveis é altamente desejável quando se quer reduzir ou eliminar essa poluição sem perder a oportunidade de desenvolvimento de uma atividade produtiva qualquer. No presente trabalho delimitou-se a atividade alvo como sendo o processo produtivo de cerâmica estrutural conhecida como cerâmica vermelha. A indústria de cerâmica vermelha, em seus aspectos atuais, está associada à idéia de degradação ambiental. Esta decorrente de impactos observados durante o seu processo produtivo, pois, os seus produtos dão-se com o uso de recursos naturais a argila – principal matéria-prima – e a lenha – principal insumo energético. Do ponto de vista econômico o insumo energético representa cerca de 35% do total dos gastos mensais para a produção dos produtos cerâmicos. Estudou-se a alternativa de utilizar o Capim Elefante como insumo energético para atender as condições de sustentabilidade econômica e ambiental. A utilização do Capim Elefante em indústria de cerâmica vermelha tem características e dificuldades peculiares que foram analisadas com cuidados para oferecer a melhor alternativa do ponto de vista técnico, econômico e ambiental. O Capim Elefante tem sido identificado como uma espécie altamente eficiente para converter a energia solar incidente em energia química estocada nas plantas (ciclo

fotossintético C4), resultando num potencial para produção de matéria seca. Sendo assim, visando proporcionar uma análise comparativa das diferentes etapas do processo produtivo de cerâmica estrutural, mas, que tenha como insumo energético o Capim Elefante, a metodologia de análise de ciclo de vida tem sido utilizada. O insumo energético avaliado possui um considerável potencial energético e pode ser produzido de forma sustentável. Com a análise de impactos, verificou-se que os poluentes gerados nas diferentes etapas do processo produtivo estão ligados, principalmente, a seis impactos ambientais, sendo eles a chuva ácida (kg SO₂ eq/kg), toxicidade humana (kg 1-4 DCB eq./kg), ozônio a baixa altitude (kg CFC – 11 eq./kg), eutroficação (kg PO₄³ eq /kg), aquecimento global (kg CO₂ eq/ kg) e consumo de energia (GJ).

Palavras Chave

Análise do Ciclo de Vida, Capim Elefante, Cerâmica Estrutural, Meio Ambiente, Desenvolvimento Sustentável.

Abstract

Seye, Omar, *Life Cycle Assessment Applied to the Productive Process of Structural Ceramic tends as Input Energy Elephant Grass (Pennisetum Purpureum* Schaum), Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 147 p.)
Doctoral Thesis

In order to meet the sustainable development, energy plays a significant role. The majority of pollution in human activities is related to it. Renewable energies use's desired to reduce or even eliminate the pollution without limiting the development of any industrial/business opportunity. In the present work the activity objective was defined as being the productive process of structural ceramic known as red ceramic. The industry of red ceramic, in its current aspects, it is associated to the idea of environmental degradation. This due to impacts observed during its productive process, because, its products are given with the use of natural resources the clay - main raw material - and the firewood - main energy input. Of the economic aspect the energy input represents about 35% of the total of the monthly expenses for the production of the ceramic products. It was studied the alternative of using the elephant grass as energy input to assist the conditions of economic and environmental sustainable. The use of the elephant grass in industry of red ceramic has characteristics and peculiar difficulties that were analyzed with cares to offer the best alternative of the technical, economic and environmental aspect. The elephant grass has been identified highly as a species efficient to convert the incident solar energy in chemical energy keeping in the plants (cycle photosynthesis C4), resulting in a potential for production of dry matter. Being like this, seeking to provide a comparative analysis of the

different stages of the productive process of structural ceramic, but, that he/she has as energy input the elephant grass, the methodology of life cycle assessment has been used. The appraised energy input possesses a considerable energy potential and it can be produced in a maintainable way. With the analysis of impacts, it was verified that the pollution generated in the different stages of the productive process is tied up, mainly, to six environmental impacts, being them the acid rain (kg SO₂ eq.kg), human toxic (kg 1-4 DCB eq. /kg), ozone the low altitude (kg CFC - 11 eq. /kg), eutrofication (kg PO₄ eq /kg), global heating (kg CO₂ eq / kg) and consumption of energy (GJ).

Key Words

Life Cycle Assessment, Elephant Grass, Ceramics Industry; Environment; Sustainable Development

Índice

Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xiii
1 - Introdução	1
1.1 Caracterização da indústria de cerâmica estrutural	2
1.2 Objetivos do trabalho	9
1.3 A tese	10
1.4 Contribuição científica	11
2 – A Biomassa como Fonte Alternativa de Energia	13
2.1 Definição	13
2.2 Contexto histórico	13
2.3 As motivações para se considerar a biomassa como uma fonte de energia	14
2.4 Potencial da biomassa	19
2.5 Tecnologias de conversão para uso moderno da biomassa	23
2.5.1 Combustão da biomassa	24
2.5.1.1 Definição e fundamentos	24
2.5.1.2 Influência das propriedades do combustível	27
2.5.1.3 Poluição do ar por produtos de combustão	28
3 – Análise de Ciclo de Vida (ACV)	33
3.1 Contexto geral	33
3.2 Evolução histórica da ACV	36
3.3 Metodologias de análise ambiental	38

3.4	Objetivos de uma ACV	39
3.5	Metodologia de análise de ciclo de vida	41
3.5.1	Definição dos objetivos e do escopo	42
3.5.1.1	Função e unidade funcional	42
3.5.2	Análise do Inventário	43
3.5.2.1	Coleta e qualidade dos dados	44
3.5.2.2	Alocação	46
3.5.3	Análise de impactos	47
3.5.3.1	Classificação	48
3.5.3.2	Caracterização, normalização e avaliação	49
3.5.4	Interpretação ou análise de melhorias	49
3.5.4.1	Consistência	50
3.5.4.2	Perfeição	50
3.5.4.3	Análise de contribuição	51
3.5.4.4	Análise de perturbação	51
3.5.4.5	Análise de sensibilidade e incerteza	51
3.6	Limitações	52
4	Experiências de Queima de Capim Elefante para a produção de tijolos	53
4.1	Caracterização do Capim Elefante	54
4.1.1	Densidade a granel	54
4.1.2	Análise química imediata	55
4.1.3	Análise química elementar	56
4.1.4	Análise do teor de lignina	56
4.1.5	Poder calorífico superior	57
4.1.6	Análise termogravimétrica	58
4.2	Resultados dos testes de alimentação usando-se cavacos de madeira e Capim Elefante	63
4.3	Testes de queima em forno de olaria	69
4.3.1	Características construtivas e de operação do forno	69
4.3.2	Resultados dos testes de queima com Capim Elefante	71
5	Aplicações da Metodologia de Análise de Ciclo de Vida em Processo Produtivo	

de Cerâmica Estrutural tendo como Insumo Energético o Capim Elefante	74
5.1 Definição dos objetivos e do escopo	74
5.1.1 Unidade funcional	75
5.1.2 Delimitação das fronteiras do sistema estudado	75
5.2 Análise do inventário	77
5.2.1 Produção e processamento do capim elefante	77
5.2.2 Balanço energético para um hectare de Capim Elefante	81
5.2.3 Extração de argila	85
5.2.4 Transporte	87
5.2.5 Processo produtivo de cerâmica estrutural	88
5.3 Avaliação dos impactos	90
5.3.1 Classificação dos impactos	90
5.3.2 Indicadores de impacto	96
5.3.3 Quantificação das contribuições aos impactos	102
5.3.3.1 Plantio de capim	102
5.3.3.2 Extração de argila	104
5.3.3.3 Transporte	106
5.3.3.4 Combustão	106
5.3.3.5 Cálculo dos impactos	110
5.3.4 Interpretação dos resultados e resposta aos objetivos estabelecidos	113
5.3.4.1 Extração da argila <i>in natura</i>	113
5.3.4.2 Produção do capim elefante	115
5.3.4.3 Análise energética	115
5.3.4.4 Processo de queima ou de produção	116
6 – Análise Técnico - Econômica do Processo Produtivo de Cerâmica Estrutural usando Capim Elefante como Insumo Energético	117
7 – Conclusões e considerações finais	127
7.1 Introdução	127
7.2 Extração de argila	127
7.3 Transporte	128
7.4 Produção do capim elefante	129

7.5 produção e Queima de Tijolos	129
7.6 Análise econômica	130
Referências Bibliográficas	131
Anexo	138

Lista de figuras

1.1	Participação do Gás Natural e Gás Liquefeito de Petróleo no consumo de energéticos na indústria de cerâmica no ano 2003	6
1.2	Médio percentual dos custos na Indústria Cerâmica	6
2.1	Consumo Mundial de Energia por Fonte	20
2.2	Oferta Mundial de Energia por Fonte	21
3.1	Etapas de um sistema de produção	35
3.2	Etapas de uma ACV e suas principais aplicações	41
4.1	Curvas TG para diferentes condições e espécies (100k/min)	60
4.2	Curvas DTG para diferentes condições e espécies (100k/min)	60
4.3	Curvas TG para diferentes condições e espécies (60k/min)	61
4.4	Curvas DTG para diferentes condições e espécies (60k/min)	61
4.5	Curvas TG para diferentes condições e espécies (20k/min)	62
4.7	Comportamento do capim elefante no silo de alimentação	68
4.8	Seção transversal do forno	70
4.9	Seção transversal do forno mostrando o posicionamento dos termopares	70
4.10	Comportamento térmico das misturas testadas	72
5.1	Estrutura geral do sistema estudado	74
5.2	Fardos de capim elefante	79
5.3	Extração de argila	84
5.4	Transporte de argila	86

5.5	Transporte de tijolos	87
5.6	Impactos totais não normalizados	111
5.7	Áreas degradadas	114
6.1	Planta dos galpões	119

Lista de Tabelas

1.1	A indústria da Cerâmica Vermelha no Brasil	2
1.2	Evolução do consumo energético no segmento cerâmico (Unidade: mil tep*)	3
1.3	Participação dos tipos de combustíveis no consumo de energéticos do segmento cerâmico (unidade: %)	4
2.1	Reações estequiométricas de combustão	24
2.2	Resultados de análises de cinzas do capim elefante produzido no projeto PIB e de outras biomassas selecionadas na literatura	27
3.1	Indicadores de qualidade de dados em ACV	46
4.1	Resultados da análise imediata para o capim elefante, bagaço e palha da cana-de-açúcar	55
4.2	Composição química do capim elefante comparado com bagaço e palha de cana-de-açúcar	56
4.3	Resultados do teor de lignina no capim elefante e na palha de cana-de-açúcar	57
4.4	Análise estatística das variáveis estudadas – Cavaco de madeira	64
4.5	Análise estatística da variável vazão mássica para capim elefante e com velocidade de rotação da rosca-sem-fim de 2 r.p.m	65
4.6	Análise estatística da variável vazão mássica para capim elefante e com velocidade de rotação da rosca-sem-fim de 4 r.p.m	66
4.7	Proporções de mistura, vazões e temperaturas médias	71
5.1	Características físico-químicas do solo das duas regiões	77

5.2	Energia de entrada – Input energy	83
5.3	Níveis de energia	83
5.4	Classificação dos impactos	94
5.5	Indicadores relativos ao esgotamento das reservas	97
5.6	Fatores de emissões relativos à emissão instantânea de 1 kg de gás	98
5.7	ODP (Potencial de Deterioração da camada de ozônio)	99
5.8	Potencial de acidificação (AP) das principais substâncias ácidas	100
5.9	Potencial de eutroficação (NP) das principais substâncias à base de azoto e fósforo	100
5.10	Resumo dos fatores de equivalências ambientais	101
5.11	Estimativa das emissões devido ao plantio de capim elefante	102
5.12	Emissão de CH ₄ devido à atividade de extração de argila	104
5.13	Fatores de emissões para máquinas de mineração – retroescavadeira	104
5.14	Quantificação das emissões devido ao consumo de combustível na atividade de escavação	104
5.15	Fatores de emissões para veículos de carga com consumo de 13,3 l/100 km	105
5.16	Quantificação das emissões na etapa de transporte da argila e do capim elefante	105
5.17	Fatores de emissões para combustão da biomassa e resíduos agro florestais	106
5.18	Quantificação das emissões na etapa da queima dos produtos cerâmicos	106
5.19	Cálculo das emissões de CO ₂ devido a combustão do capim elefante para a produção de 1 milheiro de tijolo	107
5.20	Planilha de inventário da análise de ciclo de vida do processo produtivo de cerâmica estrutural em relação a um milheiro de tijolos	109
5.21	Impactos totais não normalizados	110
5.22	Impactos totais não normalizados expressos em porcentagens	110
5.23	Fatores para normalização de impactos	112
5.24	Impactos ambientais normalizados	113

Capítulo 1

Introdução

A relação entre o setor industrial e o meio ambiente nem sempre tem sido fácil. Com efeito, a atividade industrial encontra-se, inevitavelmente, associada à certa degradação da qualidade do ambiente, uma vez que não existem processos de produção que sejam totalmente limpos. Os impactos ambientais decorrentes das emissões industriais variam com o tipo de indústria, matérias-primas utilizadas, produtos fabricados, substâncias produzidas e dos próprios processos de produção.

A indústria de cerâmica vermelha, em seus aspectos atuais, está associada à idéia de degradação ambiental. Esta degradação decorre de impactos observados durante o processo produtivo, pois, os produtos são obtidos com o uso de recursos naturais: a argila – principal matéria-prima – e a lenha – principal insumo energético.

Existe uma tendência mundial, que se iniciou na Europa e na América do Norte, do consumidor propor-se a pagar mais por um produto ambientalmente “correto” e a não comprar produtos que provoquem danos ao meio ambiente. Esta realidade coloca as empresas que operam nos setores “críticos” - aquelas que estão em contato direto e indissolúvel com o meio ambiente – num fogo cerrado tanto do público alvo quanto do organismo fiscalizador.

As relações entre o meio ambiente e o desenvolvimento devem deixar de ser conflitante para tornar-se uma relação de parceria. Segundo o World Business Council for Sustainable Development, para que seja possível conciliar o crescimento econômico com o ambiente, as

relações entre a atividade das empresas industriais e os fatores ambientais devem assentar no conceito de “eco-eficiência”, tal como foi definida por este organismo internacional em 1993: *a eco-eficiência é atingida através da produção de bens e serviços a preços competitivos que satisfaçam as necessidades humanas, melhorem a qualidade de vida e, progressivamente, reduzam os impactos ecológicos e a intensidade de utilização de recurso ao longo do ciclo de vida desses bens, até o nível compatível com a capacidade de carga estimada do planeta.*

Percebe-se, então, que a eco-eficiência está relacionada à auto-sustentabilidade ambiental do processo e sendo assim, o desenvolvimento da atividade industrial cerâmica atual requer determinadas observações em relação às formas de utilização de recursos naturais (lenha e argila) e suas consequências socioambientais.

1.1 - Caracterização da indústria de cerâmica estrutural

Presente em todas as regiões do Brasil a indústria de cerâmica estrutural ou vermelha tem um papel importante na economia brasileira. Números levantados pela Associação Brasileira de Cerâmica, junto com associações de diversos segmentos cerâmicos estão na tabela 1.1.

Tabela 1.1 – A Indústria da Cerâmica Vermelha no Brasil

Número de Unidade Produtora (empresas)	7.000 (90% microempresas familiares; 10% mais de 100; 30% entre 50 e 1000; 50% entre 20 e 50 e 10% menos de 20)
Números de Peças / Ano (bloco)	25.224.000
Números de Peças / Ano (telha)	4.644.000
Quantidade Produzida (em massa t/ano)	64.164.000
Matéria-prima (t argila)	82.260.000
Número de empregados diretos	210.000
Faturamento (R\$ bilhões)	4,2
Consumo térmico médio	900 kcal/1000 peças (90% lenha)

Fonte: Anuário Associação Brasileira de Cerâmica, 2004.

Apesar disso, o segmento de cerâmica estrutural ou vermelha é considerado o “primo-pobre” da indústria de cerâmica em comparação com a cerâmica branca ou cerâmica de

revestimento onde as exigências, e conseqüentemente o padrão de qualidade, são maiores. Este cenário resulta, em parte, das características explícitas da própria indústria de cerâmica vermelha que:

- **Possui processos de grande consumo energético**

O perfil energético do sistema industrial brasileiro está baseado em setores que exigem grandes consumos de energia com determinada qualidade. Entre esses setores, está o cerâmico, grande consumidor de energia térmica, hoje suprida basicamente pela combustão de fontes de energia primárias e secundárias, como por exemplo, lenha, eletricidade, óleo combustível e gás natural, o que mostramos nas tabelas 1.2 e 1.3. A cerâmica estrutural ou vermelha é produzida utilizando processos tradicionais e tendo a queima da lenha como principal fonte de calor em fornos com baixa eficiência o que significa dizer que o uso de energia térmica no setor cerâmico vermelho é feito de forma muito ineficiente. Uma análise do balanço energético nacional permite verificar que no ano de 2003, a lenha foi responsável por quase metade (49,1 %) do consumo total de energia no setor cerâmico, sendo que o principal consumidor deste tipo de insumo, neste setor, é o segmento de cerâmica vermelha onde a lenha representa cerca de 98 % dos energéticos utilizados contra 1 a 2% de óleo combustível.

Tabela 1.2 – Evolução do consumo energético no segmento cerâmico (Unidade: mil tep*)

IDENTIFICAÇÃO	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Gás Natural	104	114	90	102	134	156	260	430	706	788
Carvão Vapor	84	68	61	66	47	21	34	42	28	46
Lenha	1.494	1.405	1.545	1.592	1.607	1.632	1.629	1.564	1.486	1.534
Outras Recuperações	45	48	54	35	10	39	40	40	39	30
Óleo Diesel	7	7	7	6	7	6	5	5	7	8
Óleo Combustível	488	506	532	547	577	528	468	390	348	287
Gás Liquefeito de Petróleo	136	192	219	302	288	318	357	236	152	139
Outros resíduos energéticos do Petróleo	0	0	9	0	47	29	41	52	52	48
Gás Canalizado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Eletricidade	162	173	187	222	231	233	234	229	238	245
Outras Fontes não especificadas	8	8	9	11	1	1	1	1	0	0
Total	2.528	2.521	2.711	2.883	2.949	2.962	3.068	2.989	3.057	3.125

Fonte: Ministério de Minas e Energia – Secretaria de Energia

* toneladas equivalentes de petróleo

Apesar de ter-se, nestes últimos anos, observado uma redução percentual da participação da lenha de 59,1 % do total de energia consumida neste setor em 1994 para 49,1% em 2003, não se pode dizer o mesmo para a participação quantitativa da lenha.

Tabela 1.3 - Participação dos tipos de combustíveis no consumo de energéticos do segmento cerâmico (unidade: %)

IDENTIFICAÇÃO	1994	1995	1996	1997	1998	1999	200	2001	2002	2003
Lenha	59,1	55,7	57	55,2	54,5	55,1	53,1	52,3	48,6	49,1
Gás Natural	4,1	4,5	3,3	3,5	4,5	5,3	8,5	14,4	23,1	25,2
Óleo Combustível	19,3	20,1	19,6	19	19,6	17,8	15,3	13,1	11,4	9,2
Elettricidade	6,4	6,9	6,9	7,7	7,8	7,9	7,6	7,7	7,8	7,8
Outros combustíveis	11,1	12,8	13,2	14,6	13,6	14	15,5	12,6	9,1	8,7
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Fonte: Ministério de Minas e Energia – Secretaria de Energia

As tabelas 1.2 e 1.3 mostram claramente que uma redução percentual da participação da lenha não se traduz automaticamente em redução quantitativa do uso da lenha. No mesmo período avaliado, houve aumento de consumo de outros energéticos como a eletricidade e o gás natural. Um dos motivos desta estagnação no uso da lenha diante do crescimento da demanda por energéticos na indústria de cerâmica pode ser explicado pela dificuldade de obtenção desta. Já que as matas nativas estão cada vez mais escassas, o controle ambiental mais rigoroso e as distâncias de transporte até a indústria aumentaram e, por consequência, também os custos envolvidos e o preço de mercado.

Dentro das novas fontes energéticas utilizadas na indústria de cerâmica, as que têm mais penetração – quantitativas – são o gás natural e o gás liquefeito de petróleo. A figura 1.1 mostra as porcentagens de participação do gás natural e do gás liquefeito de petróleo no consumo total de energético no ano de 2003. É importante ressaltar que o uso do gás no setor cerâmico fica mais por conta do segmento de cerâmico de revestimento onde são observados os processos tecnológicos mais avançados. O uso do gás como principal fonte de energia térmica nas indústrias de cerâmica vermelha exige uma readaptação dos fornos, isto é, novos investimentos. Com o estado tecnológico dos atuais fornos utilizados isso se torna praticamente inviável.

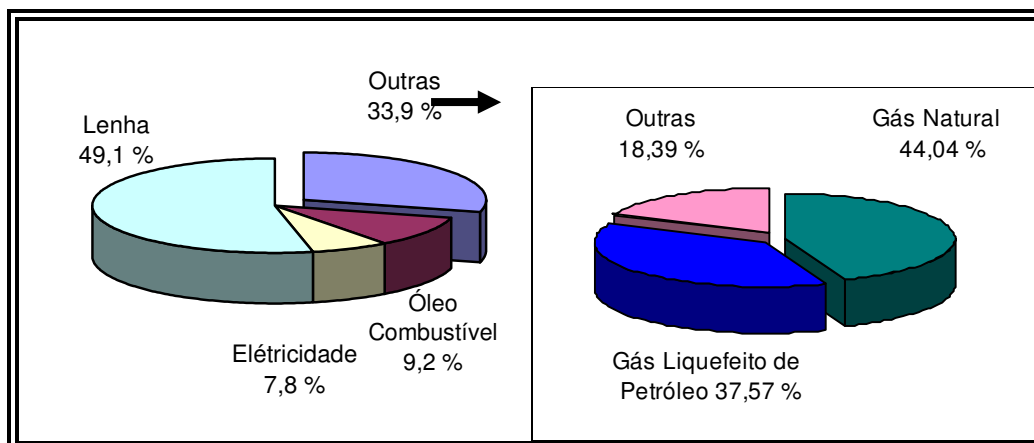


Figura 1.1 - Participação do Gás Natural e Gás Liquefeito de Petróleo no consumo de energéticos na indústria de cerâmica no ano 2003.

Fonte: Ministério de Minas e Energia – Secretaria de Energia - Elaboração própria.

- **Impactos sócio-ambientais muito grandes**

Como se vê o consumo de lenha é ainda substancialmente elevado. Como não há reflorestamento, o problema do desmatamento, sem nenhum critério, de áreas vitais torna-se muito grande, alimentando cada vez mais e de forma decisiva a desertificação de regiões. O desmatamento constitui, em nível global, a segunda maior fonte emissora de dióxido de carbono. Com o corte das árvores para uso agrícola da terra ou para outros fins, a maior parte do carbono é queimada ou decomposta e liberada para a atmosfera. Existe uma grande incerteza sobre as emissões de CO₂ geradas no processo de desmatamento, mas estima-se que 0,6 a 2,6 x 10⁹ toneladas de carbono são liberadas globalmente todos os anos.

O elevado consumo de lenha empregada como combustível nos fornos, além de contribuir fortemente para o desmatamento, representa cerca de 25% do total de gastos mensais para a produção dos produtos cerâmicos.

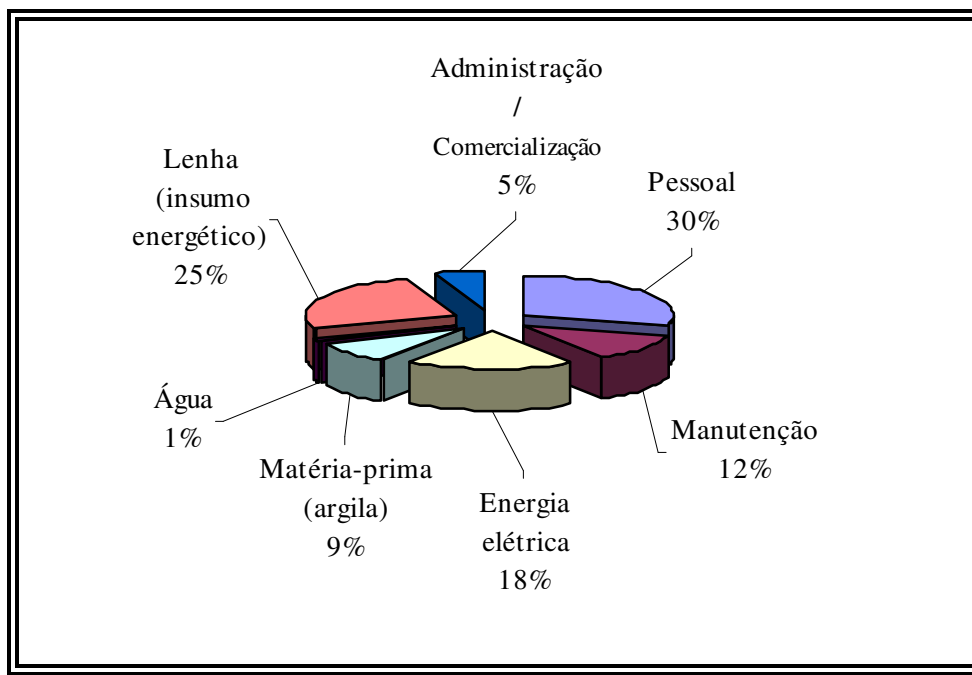


Figura 1.2 – Médio percentual dos custos na Indústria Cerâmica

Fonte: Elaboração própria

A lenha é comercializada a valores relativamente altos, em preço médio nacional de R\$ 14,60/m³ para lenha de reflorestamento e R\$13,30/m³ para lenha de mata nativa. Com isso, os custos envolvidos e o preço de comercialização dos produtos cerâmicos aumentam consideravelmente, tornando cada vez maior a necessidade de um energético alternativo ou a busca pela redução do preço da lenha cultivada.

- **Atraso tecnológico**

A busca de tecnologias de transformação e uso da energia mais eficiente, associada ao uso de combustíveis renováveis, e a equipamentos com menores emissões de gases poluentes tem se intensificado a partir da década de 90. No caso de equipamentos como forno, a busca de equipamentos mais eficientes implica na redução do consumo e emissão de poluentes para a realização de uma mesma tarefa. Particularmente quando se utiliza lenha como combustível, tem-se a redução tanto da pressão sobre as reservas florestais quanto da emissão de gases de efeito estufa.

A maioria dos fornos cerâmicos, utilizados na produção de telhas e tijolos, é de baixa eficiência térmica devido à não recuperação da energia disponível nos gases de escape. De fato, como a carga de argila em processo requer temperaturas elevadas, e por não haver sistemas de recuperação de calor, os gases de combustão saem para a atmosfera ainda com muita energia térmica, desperdiçando calor útil, (Nogueira et al., 2000).

- **Impactos associados a mineração**

A questão energética não é o único problema da indústria de cerâmica estrutural. Os argilo-minerais utilizados no fabrico de cerâmica vermelha têm como característica fundamental o baixo valor comercial, exigindo uma lavra a céu aberto e próximo aos centros consumidores, visando minimizar os custos de transporte. Mas, freqüentemente, em face da extensão da área minerada tal atividade apresenta um alto potencial de impacto ambiental, interferindo no meio físico, biótico e antrópico. O movimento de matérias-primas por ano é estimado em mais de 80 milhões de toneladas com reflexos nas vias de transportes e no meio ambiente. A mineração (extração de argila), evidentemente, causa impacto ambiental considerável que até então não foi devidamente analisado no caso do segmento de cerâmica estrutural (Soares et al., 2002). Não obstante, a atividade de extração mineral implica em alterações ambientais, pelo fato do impacto ser muito denso e pouco extenso. Reconhece-se que a mineração altera intensamente tanto a área minerada quanto a circunvizinhança, e os depósitos. Os impactos ambientais decorrentes da mineração podem ocorrer em nível local ou regional, dependendo do porte do empreendimento, de sua localização e das características da jazida.

Com efeito, dentro desses contextos, o estudo da problemática ambiental associada a projetos de desenvolvimento sustentável que procura formas de aliviar o uso da lenha através de soluções de curto e médio prazo, mas compatíveis com as exigências da indústria de cerâmica estrutural, torna-se conveniente adotar uma metodologia que possa facilitar a análise dos problemas e permitir a busca de soluções adequadas. Até porque, qualquer que seja o processo utilizado na produção de produtos cerâmicos, haverá sempre a possibilidade de gerar subprodutos e resíduos, cuja quantidade e qualidade dependerão, naturalmente, da forma de exploração das jazidas, do tipo de biomassa e também da tecnologia de queima empregada.

As peculiaridades levantadas acima mostram que a problemática do processo produtivo da indústria de cerâmica estrutural define-se claramente em duas situações vivenciadas: a necessidade de uma melhor utilização de recursos naturais não renováveis e a racionalização do consumo de fontes energéticas esgotáveis ou a busca de alternativas energéticas. Ambas as situações, porém, apresentam necessidades comuns, sendo a principal delas, a necessidade de mais pesquisas que possam justificar a viabilidade técnica e econômica de uma ou outra opção.

A necessidade de pesquisa pode ser justificada não apenas pelos impactos ambientais associados ao processo industrial ou pelo consumo de matérias-primas e insumos energéticos, mas também pela importância da consideração desses parâmetros no desenvolvimento de novos modelos de produção. Dessa forma, o problema central abordado neste trabalho está direcionado para a busca de informações que possam proporcionar a adoção de novos modelos de gestão e de produção na indústria de cerâmica vermelha de modo a proporcionar melhorias no setor cerâmico através do uso eficiente da energia térmica, da escolha e da preparação da biomassa para uma combustão eficiente.

A Análise do Ciclo de Vida – ACV é um processo que objetiva avaliar os encargos ambientais, associados a um produto, a um processo ou a uma atividade, pela identificação e quantificação da energia e materiais utilizados, bem como resíduos produzidos, visando assim avaliar o impacto dessa “utilização – liberação” ao ambiente e implementar melhorias. O uso da ferramenta de ACV permite ainda: (i) estabelecer uma base de informações sobre as necessidades totais de recursos, consumo de energia e emissões; (ii) identificar aspectos em algum processo ou produto onde sejam possíveis reduções nas necessidades de recursos e emissões; (iii) auxiliar no desenvolvimento de novos produtos, processos ou atividades que reduzam, efetivamente, as necessidades de recursos e/ou emissões.

Quando tal procedimento é integrado de forma industrial, quer dizer, acoplado à análise de viabilidade econômica num esquema de melhoria ou de decisão, a análise de ciclo de vida pode permitir a concepção, a melhoria ou o desenvolvimento de produto ou processo ótimo do ponto de vista ambiental, técnico e econômico.

1.2 - Objetivos do trabalho

Este trabalho tem por objetivo o uso da ferramenta de análise de ciclo de vida para realizar diagnóstico de impactos ambientais e oferecer indicadores que possam medir a eficiência energética na indústria e permitir a avaliação da substituição de um insumo energético. Em virtude deste objetivo foi escolhido um segmento da indústria brasileira que como já foi discutido apresenta peculiaridades energéticas. O segmento escolhido, para análise, é o da indústria de cerâmica vermelha ou estrutural. Em relação ao insumo energético alternativo o escolhido é o capim elefante.

As metas e os objetivos específicos deste estudo são as seguintes:

- Realizar diagnóstico de impactos ambientais visando à substituição de um insumo energético tradicional (lenha) – utilizado de forma não sustentável no processo de queima dos produtos cerâmicos - por um insumo energético alternativo que pode vir a ser cultivado de forma sustentável (capim elefante);
- Realizar a análise de ciclo de vida para criar oportunidades à identificação de soluções para os problemas ambientais das indústrias de cerâmica estrutural através do estudo e da avaliação de seus processos produtivos e dos impactos ambientais associados aos mesmos;
- Aperfeiçoar a gestão dos processos da indústria cerâmica estrutural, objetivando a utilização do Capim Elefante como uma fonte alternativa de energia;
- Avaliar economicamente o impacto do uso do capim elefante em processo produtivo cerâmico;
- consolidar e difundir a metodologia de análise de ciclo de vida, ferramenta capaz de gerar dados qualitativos e quantitativos para a análise e a hierarquização de impactos ambientais na indústria de cerâmica estrutural.

1.3 - A tese

Os problemas ambientais e econômicos não podem ser abordados isoladamente, visto que são aspectos que interagem entre si, sendo dependentes uns dos outros. Na tese, ora apresentada, argumenta-se que a introdução do capim elefante como insumo energético alternativo para geração de calor pode representar uma importante fonte de energia sustentável a nível local e regional. As razões para a tese estão calçadas nos seguintes argumentos:

- O capim elefante como cultivo energético, além de todas as vantagens que a substituição de outras fontes energéticas pode representar, apresenta vários aspectos que podem ser considerados de especial importância para a conservação do meio ambiente, tais como:
 - Trata-se de cultivo que, geralmente, requer condições de cultivo menos exigentes, o que se traduz em menores necessidades de fertilizantes, herbicidas ou pesticidas, evitando, por uma parte, o possível impacto gerado em sua produção e, por outra, os perigos de contaminação do meio natural;
 - Grande alcance social pela geração de empregos em áreas carentes. A “capincultura” pode ser praticada em solos pobres e degradados e deve ser uma atividade intensiva em mão-de-obra. Isso lhe confere a vantagem ambiental de recuperação de áreas degradadas de regiões e de conter o fluxo migratório das populações rurais para os centros urbanos em busca de oportunidades de trabalho.
 - Dado que a cultura do capim elefante como insumo energético, deve ser planejado dentro de projeto que, na maioria dos casos, desenvolvem-se dentro de um entorno regional, evita-se o impacto representado pela realização de novas infra-estruturas para o transporte dos recursos energéticos ou da energia produzida (ao contrário do que ocorre com os gasodutos e oleodutos, por exemplo);
 - Por ser uma cultura de rotação curta, permite o corte em 90 dias após o plantio, contra, por exemplo, sete anos da floresta de eucalipto;
 - Produção de biomassa seca expressa em toneladas por hectares/ano cerca de 5 vezes superior ao da floresta de eucalipto.

- Existe uma demanda habitacional reprimida (déficit) estimada em cerca de 10 milhões de unidades no Brasil, por outro lado, a procura por habitação está diretamente relacionada ao preço do tijolo (material básico na construção). Supondo que uma unidade habitacional popular digna, tenha que ter, em média, 60 m² de área construída, a demanda em material cerâmico tem que aumentar consideravelmente em curto e em médio prazo, conseqüentemente, a demanda por insumo energético também. Na medida em que o preço e o custo do tijolo caiam em função do uso de um recurso energético de menor custo, aumenta proporcionalmente a procura por tijolo.

1.4 - Contribuição científica

A tendência mais recente tem sido o uso do termo “engenharia ambiental” para englobar um amplo campo de pesquisa. Dentro da engenharia ambiental aplicada a processos produtivos, o consumo de energia e os impactos gerados são temas de grande relevância. Um estudo que possibilite disponibilizar:

- Informações que permitam focalizar os principais pontos do processo onde o consumo de energia e os impactos são mais acentuados, bem como, propor soluções;
- Dados sobre o capim elefante como fonte alternativa de insumo energético;
- Dados experimentais sobre a queima do capim elefante em forno de olaria e;
- A comparação do uso do capim elefante, com os combustíveis convencionais, têm um caráter inédito quando se trata principalmente de um segmento do setor industrial, até agora considerado como o “primo pobre” do setor cerâmico brasileiro.

Esta pesquisa buscou obter uma resposta embasada, utilizando uma ferramenta de análise de ponta, parcialmente desenvolvida e testada na realidade dos processos produtivos de cerâmica estrutural.

O trabalho foi desenvolvido em seis capítulos, incluindo esta introdução. A proposta do segundo capítulo é discutir o estado da arte das tecnologias de conversão da biomassa, dando ênfase às tecnologias de conversão termoquímica e, particularmente, na tecnologia de combustão e nos tipos de poluição atmosféricos resultantes.

No terceiro capítulo foi realizada uma descrição da metodologia de análise de ciclo de vida e discutido os referenciais teóricos sobre a aplicação desta ferramenta mostrando seus pontos favoráveis e deficiências.

O quarto capítulo apresenta os resultados das experiências de queima do capim elefante em indústria de cerâmica vermelha.

O quinto capítulo refere-se ao estudo de caso onde a metodologia de análise de ciclo de vida é aplicada a um processo produtivo de cerâmica estrutural, tendo como insumo energético o capim elefante.

No sexto capítulo é discutida a viabilidade econômica da introdução do capim elefante na indústria de cerâmica vermelha.

O sétimo capítulo refere-se às conclusões deste estudo e a apresentação da necessidade de futuras atividades para a complementação do mesmo.

Capítulo 2

A Biomassa como fonte alternativa de energia

2.1 - Definição

O termo biomassa foi inventado por volta de 1975 para descrever os materiais que podem ser utilizados como combustível. Ela inclui toda matéria orgânica de origem vegetal ou animal, inclusive os materiais procedentes de sua transformação natural ou artificial. No seu conceito mais amplo, inclui toda a matéria existente num dado momento na terra. Do ponto de vista energético, biomassa é toda matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia. O termo biomassa é utilizado também no campo da Ecologia para expressar a matéria orgânica total presente em um determinado ecossistema e no campo da Microbiologia Industrial com referência à quantidade de microrganismos presentes em um fermentador ou produzidos em um cultivo. Na atualidade, se aceita o termo biomassa para denominar o grupo de produtos energéticos e matérias-primas – tipo renovável – originados a partir da matéria orgânica formada por via biológica. Ficam excluídos deste conceito, os combustíveis fósseis e os produtos orgânicos deles derivados, embora também tivessem uma origem biológica em épocas remotas.

2.2 - Contexto histórico

A biomassa, juntamente com a energia solar, representam as únicas fontes de energia utilizadas pelo homem durante a maior parte da história da humanidade. Antigamente, a madeira era o combustível mais amplamente utilizado para cobrir as necessidades de calor e de

iluminação, tanto no âmbito doméstico quanto nas distintas aplicações industriais existentes até o presente momento. Do mesmo modo, grande parte das atividades realizadas pelo homem e pelos animais exigiam um consumo de biomassa que, posteriormente se transformava em trabalho muscular. Entretanto, a partir da era industrial, seu uso foi relegado a segundo plano devido à extinção das florestas dos países desenvolvidos (os detentores da tecnologia) e a conversão dos sistemas térmicos aos combustíveis fósseis.

Nos últimos anos, principalmente no final da década de 70, por causa da crise do petróleo, tomou-se consciência da necessidade da utilização de outras formas de energia diferentes dos combustíveis fósseis. A partir de então a biomassa começou a ser considerada como uma potencial fonte de energia. No transcurso destes anos, ocorreu uma série de profundas mudanças nos setores energéticos, agrícolas e ambientais, os quais motivaram aquilo que até então se vislumbrava como uma possibilidade a se apresentar hoje como uma alternativa real para um futuro mais ou menos imediato.

2.3 - As motivações para se considerar a biomassa como uma fonte de energia

A biomassa é uma fonte de energia renovável que apresenta um potencial de exploração para as zonas rurais. De acordo com a localidade, ela pode oferecer diferentes vantagens na exploração de recursos locais, pois assim estaria contribuindo para melhorar a situação econômica dessas comunidades através da exportação de energia ou na diminuição do abastecimento externo ou, ainda, na criação de emprego qualificado e na diminuição dos impactos ambientais.

▪ Redução da dependência energética

A dependência *vis-à-vis* das importações de energia, particularmente de petróleo que provém de regiões pouco “estáveis”, comporta freqüentes riscos geopolíticos. A segurança do abastecimento de energia deve merecer então uma atenção redobrada. As fontes renováveis de energia podem contribuir para reduzir a dependência em relação às importações e incrementar a segurança no abastecimento de energia. O desenvolvimento das fontes renováveis de energia pode aumentar a criação de emprego, principalmente nas pequenas e médias empresas que

representam a maioria dessa categoria nos diferentes setores das energias renováveis. A massificação das fontes de energia renovável pode se tornar um dos motores do desenvolvimento regional levando para uma forte coesão social e econômica.

- **Revitalização do mundo rural**

As energias renováveis adotam-se particularmente bem ao mundo rural. Podemos dizer que a promoção de sua exploração deveria gerar perspectivas interessantes para o emprego rural e, por consequência, a atividade econômica.

- **Incentivo ao desenvolvimento do uso das fontes alternativas de energia: Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, Certificação e mercado de energia “verde”.**

Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, certificado verde, tarifa verde, mercado de energia verde, etc, muitos são os conceitos que caracterizam hoje o desenvolvimento de energia produzida a partir de fontes renováveis, particularmente, da biomassa. Esses conceitos testemunham uma evolução observada nos últimos anos, ou seja, que o desenvolvimento das fontes renováveis passe de mais em mais pelo mercado, e, assim, justifiquem a necessidade de obter-se um preço competitivo da energia da biomassa em relação ao preço da energia produzida a partir de fontes convencionais, isto é, um preço que possa refletir todos os custos sociais de produção e de uso. A priori, isto deverá reduzir a desvantagem competitiva que as fontes renováveis sofrem.

O protocolo de Kyoto (Dezembro de 1997) estabelece objetivos de reduções de emissões dos gases de efeito estufa para os países desenvolvidos (anexo 1 do protocolo), nomeadamente reduções de 8 % na União Européia e na Suíça, 7 % nos Estados Unidos, 6 % no Canadá, Hungria, Japão e Polônia. Rússia, Nova Zelândia e Ucrânia deverão estabilizar ao mesmo nível de 1990, enquanto a Noruega pode aumentar cerca de 1 %, a Austrália 8 % e a Islândia 10 %. A estabilização das emissões de cada país deverá ser obtida num prazo de 5 anos, iniciando em 2008 e terminando em 2012. Os países têm uma certa flexibilidade na forma como poderão reduzir as emissões. Além do desenvolvimento de políticas e medidas domésticas, o protocolo prevê três tipos de mecanismos:

- **Comércio Internacional de Emissões:** Os Signatários do Protocolo de Kyoto, doravante denominados Partes, os quais reduzirem as emissões de gases de efeito estufa abaixo dos valores estabelecidos, poderão vender cotas às outras Partes, ou, se suas emissões estiverem acima do permitido, poderão comprar cotas de emissões extras.
- **Implementação Conjunta:** trata-se de uma forma específica de comércio de emissões, mas ao nível de projeto (isto é, substituição de combustíveis) com outras Partes do Anexo 1, resultando numa redução adicional de emissão no país onde o projeto está localizado. Aquela redução pode ser usada para aumentar a permissão de emitir da parte financiadora do projeto, enquanto a permissão de emitir da parte onde o projeto está sendo desenvolvido é reduzida correspondentemente.
- **Mecanismo de Desenvolvimento limpo:** assenta-se numa base de projeto, mas as Partes onde os projetos são localizados e as reduções alcançadas não estão sujeitos a obrigações de reduções. No entanto, as reduções de emissões resultantes podem ser certificadas por agentes independentes. Esse mecanismo permite aos países industrializados financiar projetos de redução nos países em desenvolvimento e receber créditos por isso.

Mas, como foi referenciado no trabalho “Acordos Internacionais Sobre Mudanças Climáticas” (MUYLAERT, 2000), muitos estudiosos criticaram o mecanismo AIJ – Atividades Implementadas Conjuntamente – entre países Anexo I e não-Anexo I. Tais críticas viriam a estender-se ao Mecanismo de Desenvolvimento limpo. O que se observa é, a formação de um mercado, chamado de “mercado do direito de poluir”, o qual favorece as grandes nações. Estas, estariam escoltando-se nos países em desenvolvimento para cumprir seus compromissos de redução de emissão de gases de efeito estufa. Esta é uma crítica que, de certa maneira, apresenta redundância. Por definição, é exatamente isto: mercado do direito de poluir. Em poucas palavras, o Protocolo diferencia dois lados: países que são obrigados a reduzir suas emissões de gases e países que não precisam reduzir suas emissões de gases (estes devem somente reduzir sua taxa crescente de emissões). E, ao mesmo tempo, o protocolo (cujas regras não estão ainda definidas)

oferece mecanismos de negociações entre nações, bastante propensos a contradições, segundo tais mecanismos, os países que são obrigados a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa poderiam contabilizar suas obrigações de abatimento de gases em outros países, não reduzindo suas emissões em seus próprios territórios. Chama-se isso de “direito de poluir” porque se presume que um país poderia continuar mantendo seu modelo de desenvolvimento anterior, ou seja, poluente.

- **Certificação e mercado de energia “verde”**

Os sistemas de certificação “verdes” são mecanismos contáveis, flexíveis, transparentes e eficazes que permitem negociar, separadamente, a vantagem ambiental e a quantidade física (os kWh ou GJ) da energia “verde”. Tais sistemas, em si mesmos, não são medidas que estimulam o mercado. Elas vêm como complemento às quotas de energia “verde” impostas aos atores do sistema energético: produtores, fornecedores ou consumidores, e poder público. Trata-se claramente de uma nova aproximação para sustentar o desenvolvimento das energias renováveis que se calça em mecanismos de mercado. Esses sistemas conhecem hoje um certo desenvolvimento na Europa e nos Estados Unidos e chama a atenção dos atores industriais, mas também do poder público.

- **O sistema holandês dos certificados “verdes”.** Este sistema tem por objetivo permitir às dezenove empresas holandesas de distribuição de eletricidade atingir, a um custo menor, o objetivo de fornecer eletricidade de origem renovável aos consumidores residenciais e do setor terciário. Cada produtor recebe um certificado para uma produção de 10 MWh de eletricidade “verde”, o que garante sua origem. Em seguida, o produtor valoriza sua eletricidade vendendo-a à rede (na base do preço de atacado) e vendendo os certificados aos distribuidores que precisam deles. São os distribuidores que devem se inscrever a uma quota mínima de eletricidade “verde” dentro do objetivo coletivo que era de 1,7 TWh no ano de 2000. Esse sistema permite igualmente certificar a origem de toda energia produzida a partir das fontes renováveis de energia, produzida para satisfazer este objetivo coletivo ou para responder à demanda dos consumidores que se inscrevem aos programas de tarifação “verde”, isto é, que aceitam pagar mais caro para a energia, mas tendo a garantia que ela seja produzida, totalmente ou em parte, a partir das energias

renováveis. Regras, procedimentos e instituições foram instauradas para permitir o bom funcionamento e verificação do mercado: atribuição e acompanhamento dos certificados, controle das transações e verificação das contas de cada ator do mercado. Sanções são igualmente previstas em casos de fraudes ou de não respeito aos objetivos traçados.

Com o sistema de certificados *verdes*, atualmente em vigor na Holanda, o produtor holandês de eletricidade “verde” valoriza seu kWh de duas maneiras distintas, no mínimo:

- Pela venda da eletricidade à companhia distribuidora local;
- Pela venda dos certificados “verdes” correspondentes à quantidade de eletricidade produzida.

Nenhuma informação foi oficialmente publicada acerca do preço dos certificados “verdes”. Essas informações são consideradas confidenciais para cada um dos operadores do mercado e na bolsa de valores.

No Brasil, a regulamentação desse mecanismo desperta enorme atenção e, segundo o documento *Efeito Estufa e Convenções sobre a Mudança do Clima* produzido pelo Ministério de Ciência e Tecnologia e Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (MCT/BNDES, 2000), “há uma expectativa de que novos mercados e instrumentos financeiros venham a ser criados para viabilizar as transações de crédito de emissão de gases causadores do efeito estufa”. Para Silva et al. (2000), isso prova que o Protocolo é visto pelo mundo como uma espécie de salvação, tanto para o meio ambiental, como para os países desenvolvidos e em desenvolvimento, os quais podem montar uma rede de colaboração para diminuir, significativamente, as emissões naturais. Para o Centro de Referência em Biomassa (CENBIO), o Brasil, além de possuir tecnologia disponível tanto para realizar plantios de florestas como para otimizar o uso do álcool como combustível, também possui a biomassa como fonte renovável de calor e de energia elétrica (CENBIO NOTÍCIAS, nº7,1999). Vale salientar que, ao implementar a Lei 10.438 de 2002 que regulamenta o Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia (Proinfa) o Brasil acompanha a mais moderna legislação já adotada pelos países mais desenvolvidos do mundo. Para a Associação Brasileira dos Pequenos e Médios Produtores de Energia Elétrica – APMPE, a idéia de inserir fontes alternativas e renováveis na matriz energética brasileira prepara

o Brasil para o futuro, onde a geração de energia se coloca de forma estratégica como caminho para garantir um desenvolvimento contínuo, seguro e ecologicamente responsável.

2.4 - Potencial da biomassa

De acordo com as estimativas do Banco Mundial, a biomassa é, atualmente, a principal fonte de energia para cerca de 2,25 bilhões de pessoas no mundo. O conteúdo calorífico da biomassa produzida anualmente em toda a biosfera, graças aos processos de fotossíntese, é estimado em 68,08 Gtep. Esse valor supera amplamente a demanda energética da humanidade que, segundo estimativa da Agência Internacional da Energia, era de 9,9 Gtep em 2002. O potencial energético global do acréscimo de biomassa é ainda seis a sete vezes maior que o consumo mundial de energia.

A parte de energia primária provida pela biomassa em países industrializados ainda é pequena e é estimada em cerca de 3 % (HALL e HOUSE, 1995). Entretanto, o uso da biomassa, como fonte de energia, varia consideravelmente dependendo de fatores como a disponibilidade de recursos e as políticas governamentais (BAUEN, 1999).

Em países em desenvolvimento, a realidade é outra. Nesses países, a biomassa representa mais de um terço do consumo de energia primária, variando em torno de 90 % em países africanos menos desenvolvidos, para cerca de 45 % na Índia, 28 % na China e no Brasil e 10 a 15 % no México e África do Sul respectivamente (HALL et al., 1999).

Nos países em desenvolvimento a biomassa é utilizada de forma tradicional, principalmente para cocção e aquecimento. Essa forma tradicional de utilização da biomassa é bastante ineficiente e é, freqüentemente, uma fonte de preocupação ambiental, em particular com respeito à saúde devido à exposição às emissões de gases durante a combustão da biomassa. A eficiência de conversão da biomassa é baixa, tipicamente 10 a 15 % em aplicações domésticas e 15 a 20 % em aplicações industriais.

Não é provável que o uso tradicional da biomassa diminua num futuro próximo. Entretanto, os programas de pesquisas que apostam em melhorias nos usos tradicionais da biomassa e no gerenciamento eficiente de recursos da biomassa têm aumentando.

O uso comercial e não comercial da biomassa representa, atualmente, cerca de 14 % do consumo primário de energia no mundo, ou seja, aproximadamente 55 EJ (HALL et al., 1999). Aproveitando aproximadamente 1 % do total da radiação solar incidente sobre a terra, estima-se que, anualmente, sejam produzidas, pelo processo de fotossíntese, cerca de 220×10^9 toneladas de biomassa (base seca), o que equivale a uma energia de 2×10^{15} MJ, ou seja, 10 vezes a energia global consumida por ano no nosso planeta (SMIL, 1985). Existe ainda uma grande margem para se melhorar e aumentar o uso da biomassa no mundo. As figuras 2.1 e 2.2 ilustram essa realidade com ano de referência de 2000.

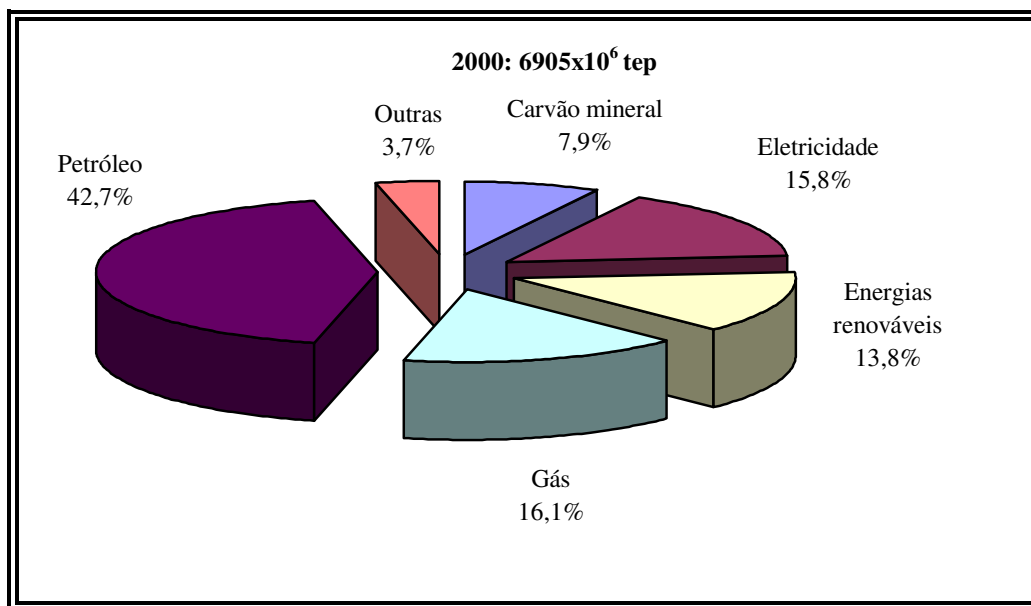


Figura 2.1 - Consumo Mundial de Energia por Fonte

Fonte: Ministério de Minas e Energia – Secretaria de Energia - Elaboração própria.

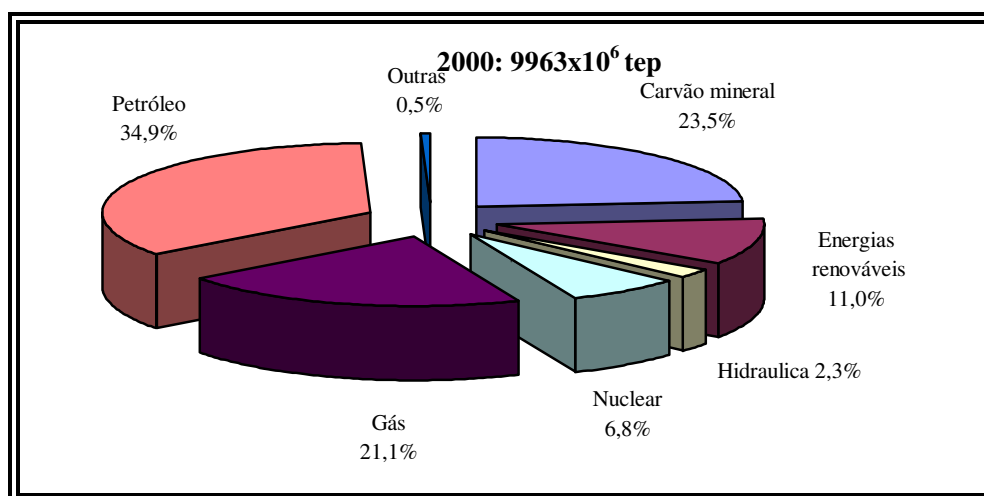


Figura 2.2 - Oferta Mundial de Energia por Fonte

Fonte: Ministério de Minas e Energia – Secretaria de Energia - Elaboração própria.

É difícil estimar o potencial da biomassa com precisão. Para a União Européia, BAUEN e KALTSCHMITT (1999a) estimaram o potencial de resíduos lenhosos provenientes da agricultura e da silvicultura como também os resíduos herbáceos provenientes da agricultura e chegaram a um valor de cerca de 4,2 EJ em comparação com o uso atual de cerca de 1,8 EJ. Nos EUA, o potencial de biomassa é estimado em cerca de 15 EJ dos quais os resíduos lenhosos da silvicultura e da agricultura e os resíduos herbáceos representam aproximadamente 2,38 EJ (KLASS, 1995; OVEREND e COSTELLO, 1998). Na África, Ásia e América Latina & Caribe, o potencial de biomassa tem sido estimada em 11 EJ, 20 EJ e 13 EJ, respectivamente. (BAUEN e KALTSCHMITT, 1999 b).

Vários cenários, especialmente o global, foram publicados nos últimos anos e em todos se espera da biomassa um papel dos mais importantes para a provisão de energia no futuro. Calcula-se que a contribuição da biomassa pode alcançar entre 60 e 145 EJ em 2025 e entre 130 e 320 EJ em 2010, dependendo das suposições feitas na demanda de energia primária e das pressões ambientais, isto é, dos limites de emissões de CO₂ (HALL et al., 1999).

Nas discussões atuais sobre políticas energética e ambiental é atribuída uma grande importância às energias renováveis. Espera-se delas uma contribuição significativa para a solução

de muitos dos problemas atuais e futuros, como reduzir o uso das energias convencionais como petróleo, carvão mineral e gás natural, evitar um aumento de gases, com efeito, estufa na atmosfera e oferecer novas alternativas de rendimento na agricultura.

Relativamente à avaliação de produtos e processos, exige-se, muitas vezes, um balanço ambiental ou ecológico. A promoção de energias renováveis é sobretudo justificada pelas múltiplas vantagens ambientais. O valor ambiental dos biocombustíveis é determinado em comparação com o dos combustíveis comerciais (carvão mineral, petróleo, gás natural). É sempre mencionado que os biocombustíveis não aumentam o teor de CO₂ na atmosfera e com isso contribuem para a proteção do clima. Na combustão de biocombustíveis (biomassa) a quantidade de emissão de CO₂ equivale à quantidade que foi retirada do ar durante o crescimento da biomassa.

Os cultivos energéticos são aqueles cultivos agrícolas ou florestais, realizados com fins de aproveitamento puramente energéticos. Como tais devem cumprir duas condições fundamentais:

- Do ponto de vista energético se estabelece a necessidade de oferecer um balanço energético positivo. Deve-se produzir elevados rendimentos em biomassa coletável, e com um mínimo de *inputs* energéticos. Conseqüentemente, os cultivos energéticos devem ser direcionados para grandes produções por unidade de superfície em curtos períodos de tempo, com o fim de compensar o menos valor agregado dos usos energéticos frente aos alimentares e por unidade de produto.
- Do ponto de vista econômico se estabelece a necessidade de obter um balanço positivo. Para que a produção seja economicamente rentável, devem ser alcançados elevados rendimentos em biomassa com baixo custo na produção, na colheita, no armazenamento e no processamento para sua transformação.

2.5 - Tecnologias de conversão para uso moderno da biomassa

As moléculas orgânicas da biomassa contêm energia acumulada em suas ligações, suscetível de ser liberada nos processos de conversão. A matéria orgânica integrante da biomassa pode proporcionar sua energia de forma direta, por combustão, ou ainda através de compostos originados por transformação da biomassa primária (álcoois e hidrocarbonetos), que também devolvem a energia contida em suas ligações ao serem oxidados em motores de explosão ou em queimadores projetados para tal fim.

A concepção moderna da utilização da biomassa para fins energéticos significa a aplicação dos conhecimentos científicos e técnicos que se possui na atualidade visando aperfeiçoar o processo de captação e de acumulação da energia solar através da fotossíntese, e o desenvolvimento de procedimentos, em nível industrial, que sejam capazes de transformar economicamente a biomassa em um combustível facilmente utilizável.

A transformação da energia solar em energia útil, em termos de aproveitamento da biomassa, sucede nos passos da produção de matéria-prima, na colheita, no processamento e no armazenamento. O espectro de aproveitamento energético de biomassa é muito vasto. Os processos de conversão da biomassa seguem, de modo geral, dois caminhos principais de acordo com o estado físico da matéria vegetal a ser utilizada:

- Termoquímica, mais adaptada aos materiais secos tal como a madeira, o bagaço e o Capim Elefante;
- Bioquímica, mais conveniente aos produtos úmidos.

Os processos termoquímicos incluem principalmente:

- Combustão;
- Gaseificação;
- Pirólise (Convencional, Rápida e "Flash") e;
- Liquefação.

No contexto desse trabalho, por ser a tecnologia utilizada na queima dos produtos cerâmicos em forno de olaria, focaliza-se a combustão.

2.5.1 - Combustão da biomassa

2.5.1.1 - Definição e Fundamentos

A combustão é um processo de degradação térmica consistindo numa seqüência de processos térmico e termoquímico na qual o carbono presente na biomassa é totalmente convertido em vapores quentes e, tendo como resíduo sólido, as cinzas.

O processo de combustão da biomassa pode ser esquematizado em seis fases ou etapas: secagem, emissão de voláteis, ignição dos voláteis, queima dos voláteis em chama, extinção da chama dos voláteis e combustão do resíduo de carbono. A tabela 2.1 ilustra as diferentes reações estequiométricas que ocorram durante a combustão. São as reações de combustão dos componentes elementares do combustível com o oxigênio. O calor liberado nas mesmas é representado por ΔQ_i .

Tabela 2.1 – Reações estequiométricas de combustão

Reações	ΔQ_i
$C + O_2 \rightarrow CO_2 + \Delta Q_1$	$CO_2 : (\Delta Q_1)_{298,15\text{ K}} = -353,146 \pm 0,046 \text{ KJ/mol}$ $H_2O : (\Delta Q_3)_{298,15\text{ K}} = -241,595 \pm 0,046 \text{ KJ/mol}$ $CO : (\Delta Q_4)_{298,15\text{ K}} = -110,436 \pm 0,167 \text{ KJ/mol}$
$S + O_2 \rightarrow SO_2 + \Delta Q_2$	
$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \Delta Q_3$	
$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO + \Delta Q_4$	

Fonte: CORTEZ e LORA, 1997

A queima de biomassa para produção de calor pode ser feita em modernas caldeiras em pequena escala ou em fornos tradicionais. Já para produção de eletricidade ou produção combinada de calor e eletricidade, a queima é feita em caldeiras maiores e em larga escala. A maioria dos processos de geração de eletricidade está baseada no ciclo Rankine no qual a biomassa é queimada em uma caldeira para produzir vapor pressurizado que, em seguida, é expandido numa turbina a vapor para fazer funcionar um gerador elétrico.

Os processos de combustão da biomassa podem ser classificados de acordo com o tipo de fornalha utilizado. A tecnologia utilizada influencia em muito o pré-tratamento do combustível (biomassa) e as atividades de limpeza dos gases resultantes do processo de combustão.

De acordo com LORA e HAPP (1997), as fornalhas podem ser classificadas de duas maneiras, a primeira depende da maneira com que é realizada a combustão e a segunda atende às características construtivas da mesma.

Em função do modo de combustão:

- Fornalhas de queima em deposição (em camada sobre uma grelha), é o caso da combustão do capim elefante em forno de cerâmica estrutural;
- Fornalha de queima em suspensão (o combustível é queimado em todo o volume da câmara de combustão).

Alguns sistemas combinam os dois modos de combustão, ou seja, uma fração do combustível é queimada na grelha e a fração restante é queimada em suspensão no volume da câmara de combustão.

Em função das características construtivas:

- Fornalhas celulares;
- Fornalhas de grelha estacionária (caso das grelhas em fornos de cerâmica estrutural) que podem ser de grelha horizontal ou grelha inclinada;
- Fornalhas de grelha móvel que podem ser mecânica ou rotativa;
- Fornalha ciclônica;
- Fornalha de leito fluidizado;
- Fornalha de queima em suspensão.

Na seleção do tipo de fornalha a ser utilizada para uma determinada aplicação industrial, visando o uso da biomassa como combustível, deve-se levar em conta os seguintes fatores:

- Tipo e grau de preparação prévia da biomassa;
- Quantidade e parâmetros (pressão e temperatura) do vapor a ser produzido;

- Disponibilidade de capital.

Na combustão em camada deve-se observar que a espessura da camada altera o mecanismo de queima. Quando se tem combustão em camada grossa, existe uma zona de redução onde o carbono reage com o CO_2 , produto da combustão formando CO . Deste modo acima da camada, a chama é produzida pela queima dos voláteis e do CO gerado na zona de redução. O oxigênio do ar é consumido totalmente na zona de oxidação, o que provoca o aparecimento da zona de redução.

A combustão em camada fina é caracterizada pela ausência da zona de redução o que acarreta à chama ser produto apenas da queima dos voláteis.

Portanto, para se garantir a queima total do combustível, é preciso introduzir uma fração do ar de combustão acima da câmara de combustão, o que é chamada de ar secundário. O ar primário é aquele introduzido abaixo da grelha.

O pré-aquecimento do ar é um fator importante para a intensificação da combustão estando a temperatura máxima do ar limitada pela resistência mecânica da grelha. Para combustível com alto teor de voláteis (como é o caso da biomassa) a temperatura do ar recomendada é da ordem de 200 a 250 °C. No caso de não se utilizar o pré-aquecimento do ar, uma parte do calor gerado na combustão será consumida para elevar a temperatura do mesmo, diminuindo a eficiência da caldeira ou forno de combustão.

Ocasionalmente, observa-se que plantas para combustão de biomassa são projetadas em termos de volumes da caldeira e área superficial da grelha e avaliadas para uma determinada capacidade, mas sabe-se que além da energia liberada pela combustão, a taxa de combustão é também importante para o dimensionamento de um sistema de combustão. As taxas de combustão com as quais a biomassa queima-se dependem de vários parâmetros físicos (KANURY,1994). Dois fatores predominantes são as taxas de transferência de calor e as taxas cinéticas das reações.

2.5.1.2 - Influência das propriedades do combustível

O tamanho das partículas, isto é, a granulométrica da biomassa influencia a transferência de calor. O alto teor de umidade da biomassa é um fator limitante no processo de combustão e influencia o balanço térmico e o rendimento da combustão. Nos processos de combustão, a umidade evaporada consome parte da energia liberada, a qual tecnicamente é difícil de recuperar, além do que dificulta a ignição do combustível e diminui a temperatura de combustão. Assim, na maioria dos sistemas de combustão, é requerido que o combustível tenha menos de 50 – 60% de umidade (base úmida), uma vez que, do ponto de vista da redução do consumo da biomassa, quanto menor for a umidade, melhor é a redução.

O baixo teor de cinza melhora o balanço térmico, reduz a oclusão e a perda de carbono no resíduo e, ainda, reduz os problemas operacionais devido à sinterização. A sinterização é função da temperatura de combustão e, no caso da biomassa, está relacionada à presença de dióxido de silício (SiO_2) que possui o mais baixo ponto de fusão entre os componentes da cinza. A tabela 2.2 mostra uma comparação da análise das cinzas do capim elefante utilizado neste estudo, bem como, os resultados de análise de capim elefante e de madeira tirado da literatura e todas as biomassas calcinadas a 900°C.

Tabela 2.2 - Resultados de análises de cinzas do capim elefante produzido no projeto PIB e de outras biomassas selecionadas da literatura.

Componentes	% em peso de cinza			
	Capim elefante em estudo	(JENKINS, 1998)		
		Capim elefante	Bagaço de cana-de-açúcar	Madeira
SiO_2	44,4	65,18	46,61	2,35
Al_2O_3	2,09	4,51	17,69	1,41
TiO_2	0,26	0,24	2,63	0,05
Fe_2O_3	16,2	2,03	14,14	0,73
CaO	7,3	5,60	4,47	41,20
MgO	10,1	3,00	3,33	2,47
SO_3	0,99	0,44	2,08	1,83
Na_2O	-	0,58	0,79	0,94
K_2O	10,2	11,60	0,15	15,00
P_2O_5	4,6	4,50	2,72	7,40

2.5.1.3 - Poluição do ar por produtos de combustão

A poluição atmosférica consiste em gases, líquidos ou sólidos, presentes na atmosfera em níveis elevados o suficiente para causar danos ao ser humano, animais, plantas e materiais. Quando se discute a origem da poluição atmosférica, uma distinção deve ser feita com relação aos processos envolvidos na formação dos poluentes. Os poluentes atmosféricos resultam ou de processo natural ou de processo antropogênico que possam liberar ou emitir matéria ou energia para a atmosfera, tornando-o contaminado ou poluído. São exemplos de fontes antropogênicas de poluição atmosférica, os diversos processos e operações industriais e a queima de combustível, entre outros.

Em condições ideais, a combustão de material hidrocarboneto deve resultar somente em dióxido de carbono (CO_2). Qualquer outra substância além do CO_2 é produto da combustão incompleta.

Criticamente relacionadas às propriedades da biomassa são as emissões de poluentes geradas pela combustão. As emissões primárias, isto é, aquelas emissões lançadas diretamente na atmosfera, como resultado do processo de combustão da biomassa são os materiais particulados, o monóxido de carbono, os hidrocarbonetos, os óxidos de nitrogênio (NO_x , principalmente NO e NO_2) e óxidos de enxofre (SO_x , principalmente SO_2). Também podem ser emitidos gases ácidos, como HCl e outros metais pesados. O CO e os hidrocarbonetos, incluindo os compostos orgânicos voláteis (COVS) e hidrocarbonetos aromáticos são produtos da combustão incompleta.

❑ **Formação de óxido de nitrogênio**

Segundo BUSANI et al. (1995), os óxidos de nitrogênio (NO , NO_2) são considerados como os poluentes atmosféricos mais comuns. Em todos os processos de combustão, quanto mais elevada for a temperatura, maior será a liberação destes poluentes. O nitrogênio do ar ou o contido no combustível pode reagir com o oxigênio, porém em quantidades muito reduzidas com relação às substâncias em questão. A consequência disso é a presença dos óxidos de nitrogênio (NO_x) nos produtos da combustão. A presença do óxido de nitrogênio em produtos de combustão foi descoberta em meados do século XIX, porém só no final da década de 50 é que começaram as

primeiras investigações sobre o processo de geração de NO_x em fornos (LORA, 2000). Nas fornalhas, forma-se principalmente o óxido de nitrogênio (NO). Este, por sua vez, pode se formar a partir do nitrogênio do ar.

❑ **Formação dos óxidos de enxofre (SO_x)**

De acordo com BUSANI et al. (1995), o óxido sulfúrico (SO_2) e óxido sulfuroso (SO_3) se apresentam como fontes de emissão mais significativas nos processos de combustão que utilizam combustíveis fósseis. As emissões de SO_x podem também ser devidas a conteúdos de enxofre nas matérias-primas. A formação e, portanto sua presença nas emissões gasosas, é consequência da oxidação de tais compostos durante a queima. Portanto, são as emissões quentes dos fornos de queima, aquelas potencialmente relacionadas aos poluentes em questão. Também os óxidos de enxofre têm seu fator de emissão relacionado não exclusivamente ao conteúdo de enxofre das matérias-primas, mas também aos parâmetros operacionais de queima.

❑ **Formação do monóxido de carbono (CO)**

Gás emitido na maioria dos processos de combustão, no caso pela combustão incompleta. O monóxido de carbono foi um dos primeiros produtos de combustão a ser reconhecido como poluente. O CO é formado como uma espécie intermediária da oxidação do carbono dos combustíveis.

❑ **Dióxido de carbono (CO_2)**

Segundo ROSA et al. (2001), o CO_2 , dióxido de carbono ou gás carbônico é o gás mais liberado dentre as emissões de origem antrópica, além de ser o gás mais importante no sentido de regulação do efeito estufa. Os volumes de CO_2 despejados na atmosfera pelas atividades humanas da década de 90 foram de 6 a 12 vezes superiores aos volumes emitidos de CH_4 e N_2O (CQNUMC, 2001), respectivamente, apesar de ser o gás com o menor poder de aquecimento global entre os três. Segundo o Manual de Inventários de Gases de Efeito Estufa do IPCC (IPCC, 1996), considera-se que, no presente, o gás carbônico de origem antrópica é principalmente emitido:

- Pela combustão de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) e seus processos industriais,
- Pela queima de combustíveis renováveis (álcool, bagaço de cana, óleos vegetais, etc.),
- Por processos industriais (produção de cimento e cal, uso de pedra calcária, produção e uso do carbonato de sódio, amônia, carbonetos, aço, ferro, alumínio e magnésio),
- Mudança no uso do solo e da silvicultura (o CO₂ é o gás mais importante nesta atividade).

Na indústria cerâmica, esse gás está presente em todas as emissões quentes das fases de secagem e queima. No caso das massas (misturas) contendo carbonatos (e também substâncias orgânicas) são consideradas, também como contribuição, as emissões de CO₂ fornecidas pela decomposição e combustão, respectivamente, dessas substâncias.

❑ **Compostos de amônia**

Freqüentemente, a matéria-prima para o suporte de produtos cerâmicos, em particular a argila, contém traços de substâncias nitrogenadas. Durante a queima, uma parte é liberada, explicando a presença destes compostos (NH₄⁺) nas emissões gasosas. Tais compostos, a exemplo do cloreto de amônia (NH₄Cl), podem condensar-se e solidificar-se ao longo das paredes das tubulações, dando origem a incrustações.

❑ **Compostos de cloro**

Nas emissões gasosas dos fornos de queima é relevante a presença de compostos de cloro (em particular, cloretos). A origem desses compostos é devida, principalmente, à decomposição, durante a queima, dos compostos de cloro contidos na matéria-prima do suporte (argila).

❑ Flúor

De todas as emissões gasosas, uma das mais preocupantes, atualmente, é a de compostos inorgânicos fluorados, resultantes da decomposição térmica das matérias-primas, com maior incidência nos subsetores da cerâmica estrutural e de pavimento e revestimento.

O flúor presente nas massas cerâmicas é, em sua maior parte, proveniente dos íons fluoreto (F) presentes na estrutura dos minerais argilosos, que substituem os íons hidroxila (OH), pelo fato de terem tamanhos similares e a mesma valência. Dessa forma, os minerais argilosos possuem concentrações de flúor especialmente elevadas.

São verificadas variações nos teores de flúor nas argilas, em função do posicionamento estratigráfico das jazidas, da composição mineral e textura. Quando os materiais cerâmicos são queimados, ocorre a destruição estrutural de alguns minerais ocorrendo a liberação do flúor sob a forma de íons fluoreto. Este reage com o vapor de água da atmosfera do forno, formando ácido fluorídrico (HF), que é posteriormente arrastado pelo fluxo gasoso até a chaminé. No entanto, o flúor também pode ser liberado sob forma de ácido fluorsilícico ou tetrafluoreto de silício, na sua forma gasosa, enquanto na fase particulada pode surgir fluoreto de cálcio (CaF).

Para BUSANI et al. (1995), a quantidade de flúor liberada para a atmosfera não é, no entanto, determinada exclusivamente pelo conteúdo de flúor na matéria-prima, mas também por outros parâmetros. Um dos principais é a temperatura da queima, sendo que quanto mais alta a temperatura, maior a quantidade de flúor liberada, que tende a diminuir também quando se passa de queima lenta à queima rápida. O conteúdo de carbonato alcalino terroso na massa também influencia, de modo que quanto maior sua concentração, menor a liberação de flúor.

Sabe-se que as emissões de fluoretos são responsáveis por doenças respiratórias, corrosão de materiais, perda do brilho de vidros, toxidade para plantas com implicações na cadeia alimentar humana e chuvas ácidas.

A emissão de fluoretos produzidos durante a queima de materiais cerâmicos tradicionais tem basicamente duas soluções possíveis: o controle do processo e a instalação de filtros.

De acordo com ALMEIDA et al. (2001), as tecnologias mais utilizadas no tratamento das emissões gasosas com fluoretos consistem, fundamentalmente, em medidas de fim de linha, englobadas em três tipos de processos de depuração: por via seca (o mais utilizado na Europa), por via semi-seca e por via úmida. Esses processos baseiam-se na reação do poluente do efluente gasoso a ser tratado, que entra em contato com o meio (sólido ou líquido), capaz de reagir, quimicamente, com o poluente. Os reagentes mais utilizados na depuração são: o carbonato de cálcio, o bicarbonato de sódio, o carbonato de sódio, o hidróxido de sódio e o óxido de cálcio.

Atualmente os altos níveis de degradação ambiental fazem com que a preocupação por este tema seja cada vez maior. Neste sentido, todo esforço realizado pelo setor cerâmico visando a minimização dos impactos ambientais é de relevante importância, seja através de medidas de economia energética ou de emprego de equipamentos e processos mais eficientes.

Como etapa fundamental para este processo de construção de um modelo de produção que permita a preservação do meio ambiente torna-se necessário um melhor conhecimento do mesmo. E é isso que este trabalho se propõe.

Capítulo 3

Análise de Ciclo de Vida (ACV)

Neste capítulo, apresenta-se o estado da arte da metodologia de análise de ciclo de vida. A evolução histórica de seu desenvolvimento, seus objetivos, aplicações e dificuldades associadas a sua aplicação (limitações).

3.1. – Contexto geral

O futuro energético do planeta tornou-se um dos mais importantes desafios da humanidade. Em meio a discussões de problemas ambientais, gerados pela utilização em larga escala de combustíveis fósseis, a Comissão Brundtland em 1987, formalizou o conceito de desenvolvimento sustentável^{3.1} e o definiu nos seguintes termos:

^{3.1} A questão da sustentabilidade é discutida desde a década de 60, mas é nos anos 70, com a publicação do livro de Dennis e Donella Meadow, *Limits to Growth*, que consegue despertar a opinião pública para esse problema. Nessa obra são descritas as consequências para o planeta, o aumento demográfico e da atividade industrial, caso as tendências de crescimento mantenham-se inalteráveis. Segundo os autores, a terra atingira o seu limite de crescimento em menos de 100 anos, o que se traduzirá numa diminuição significativa da atividade industrial (devido à escassez dos recursos naturais) e num declínio da população em algumas décadas mais tarde.

Em 1980, é publicado mais um documento importante em matéria de ambiente. Trata-se do WCS – *World Conservation Strategy*, publicado pela União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN). Nesse documento é mencionado, pela primeira vez, o conceito de “desenvolvimento sustentável”, o qual é definido como a gestão da utilização humana da biosfera, de forma a proporcionar o maior benefício sustentável às gerações presentes, mantendo a sua capacidade de satisfação das necessidades e aspirações das gerações futuras, pois nós não herdamos a terra dos nossos pais, mas pedimo-la emprestada aos nossos filhos (FERRÃO, 1998).

Essas publicações originaram um interessante confronto de idéias, nomeadamente nas sociedades mais industrializadas, e nos finais dos anos 70, inícios dos anos 80, as Nações Unidas decidiram nomear três comissões independentes, com o objetivo de estudarem os aspectos relacionados com os desequilíbrios entre os países mais pobres e os mais ricos, assim como as questões referentes aos problemas ambientais globais. Destas três comissões, a Comissão Mundial para o Ambiente e Desenvolvimento (WCED – World Commission on Environment and Development) é que, de forma mais ou menos significativa, marcou um ponto de virada na mentalidade com que as

“O desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que permite dar resposta às necessidades do presente, sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras darem resposta às delas” (WCED, 1987).

Assim sendo, o desenvolvimento sustentável constitui o futuro de qualquer atividade humana devendo ser economicamente viável, socialmente benéfico e ambientalmente adequado. A sustentabilidade exige uma visão global de uma atividade, visão essa que deve ser tão técnica e objetiva quanto possível, sendo estruturada sob forma de metodologias abrangentes e sistemáticas. Implicitamente, o conceito implica uma obrigação de interessar-se ao desenvolvimento de novas fontes de energia e de minimizar os impactos sobre o meio ambiente.

Na vertente ambiental do desenvolvimento sustentável, a avaliação do ciclo de vida é um dos instrumentos abrangentes, fazendo parte integrante do sistema de gestão ambiental consagrado pela série de normas ISO 14000.

A Norma ISO 14040 define a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) ***como a compilação dos fluxos de entradas e saídas e avaliação dos impactos ambientais associados a um produto ao longo do seu Ciclo de Vida***, ou seja, o conjunto de estados consecutivos e interligados de um produto, desde a extração de matérias-primas ou transformação de recursos naturais, até à deposição final do produto na natureza.

A avaliação do ciclo de vida também denominada de “ecobalanço” ou “análise do berço ao túmulo” é uma ferramenta concebida com o objetivo de avaliar as incidências ambientais associados a um produto, processo ou atividade, através da identificação e quantificação dos recursos utilizados e, das emissões e resíduos produzidos durante a atividade, da avaliação dos impactos ambientais e da avaliação de oportunidades de melhorias na perspectiva ambiental.

A análise abrange o ciclo de vida completo do produto, processo ou atividade, sendo de destacar as seguintes: extração dos recursos da natureza, processamento das matérias-primas;

políticas de desenvolvimento devem ser encaradas. A WCED publica, em 1987, um relatório intitulado *Our Common Future* (também conhecido como *Relatório de Brundtland*, devido ao fato da comissão ter sido dirigida pela Primeira Ministra da Noruega, a Sra. Gro Harlem Brundtland) onde é escrito a famosa definição do termo “desenvolvimento sustentável”.

produção, transporte e distribuição; utilização, reutilização e manutenção; reciclagem e descarte final. A reutilização pode ter como finalidade prolongar a vida útil do produto visando à mesma finalidade para o qual é elaborado, ou não. Já a reciclagem, consiste no reaproveitamento do material, não do produto. Caso o material venha a constituir o mesmo produto, denomina-se reciclagem fechada. Do contrário, reciclagem aberta (HEIJUNGS et al., 1992).

O termo produto é aqui considerado no seu sentido mais amplo, ou seja, incluindo bens físicos como bens de serviços, bens e serviços a nível operacionais e estratégicos (GUINÉE J., et al., 2001). A figura 3.1 é um fluxograma simplificado que ilustra o inventário do ciclo de vida de um produto genérico e onde é evidenciado em cada etapa do ciclo de vida de um produto ou processo há consumo de insumo ou energia e geração de um certo impacto ou resíduo. Sendo que o fluxograma deve ser detalhado para cada opção de produto ou atividade, resultando numa consideração completa e sistemática de todos os impactos ambientais associados a cada alternativa e etapa da seqüência entre “o berço e o túmulo”.

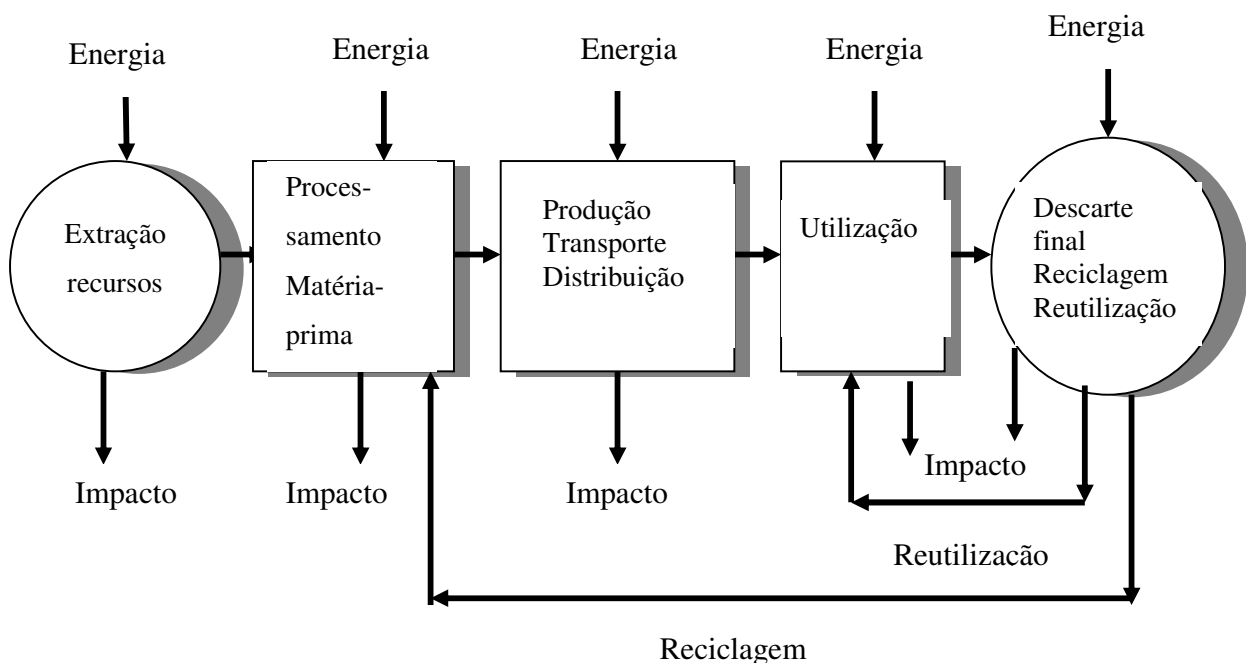


Figura 3.1 – Etapas de um sistema de produção

Fonte: CURRAM. M.A. (1996), Adaptação do autor.

3.2 – Evolução histórica da ACV

Historicamente, a origem do uso da metodologia de ACV se reporta ao início da década de setenta (MIETTINEN & HAMALAINEN, 1997), período em que questões ambientais como eficiência energética, consumo de matérias-primas escassas e destino final de resíduos sólidos tornaram-se preocupação geral.

Inicialmente, os estudos foram simples e eram, principalmente, direcionados a cálculos de entrada de energia e liberação de resíduos sólidos nos sistemas e com pouca atenção dada à avaliação de potencial impacto ambiental.

No final da década de oitenta vários estudos usando ACV foram realizados, principalmente por empresas privadas na Suécia, na Suíça e nos Estados Unidos (HUPPES, 1996; UDO de HAES, 1993). Porém, muitos desses estudos usavam métodos diferentes e foram executados sem a adoção de uma ferramenta teórica comum. Por conseguinte os resultados entre estudos, que por sinal tinham o mesmo objetivo, freqüentemente diferenciavam consideravelmente, e impediam que a ACV se tornasse uma técnica analítica mais aceitável (UDO de HAES, 1993; UNEP, 1996).

No início da década de noventa, verificou-se o envolvimento progressivo de numerosas organizações não governamentais no debate sobre importância e metodologia de análise de ciclo de vida. Iniciou-se então uma aproximação entre metodologia de análise de ciclo de vida e seu possível uso para avaliar os impactos decorrentes do uso de recursos e da emissão de alguns gases. Foi assim que efeitos como o aquecimento global e a acidificação começaram a ser investigados por meio de análise de ciclo de vida. Na mesma época, foram feitas tentativas no sentido de desenvolver e unificar a metodologia de análise de ciclo de vida sob a coordenação da Sociedade de Toxicologia Ambiental e Química - SETAC, tendo os seus progressos e resultados sido apresentados em numerosas conferências internacionais.

O debate internacional acerca da análise de ciclo de vida atingiu presentemente grande intensidade devido à participação de numerosas representações das diferentes esferas

governamentais, institucionais (SETAC, ISO e UNEP), acadêmicas, não-governamentais, empresariais e industriais, sendo de salientar que o tema é objeto de estudos de investigação fundamental e aplicada (BURGESS, A.A. & BRENNAM, D.J., 2001; AZAPAGIC, A., 1999; AZAPAGIC, A. & CLIFT, R., 1999; FORSBERG, G., 2000).

O International Standard Organisation – ISO – estabeleceu o Comitê Técnico (TC 207) encarregado de padronizar certo número de ferramentas para análise ambiental, incluindo a análise de ciclo de vida. Hoje, já foram quatro as normas internacionais publicadas pelo ISO sobre a avaliação de ciclo de vida:

- ISO 14040 (1997 E): ‘Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework’;
- ISO 14041 (1998 E): ‘Environmental management – Life cycle assessment – Goal and scope definition and Inventory analysis’;
- ISO 14042 (2000 E): ‘Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle Impact assessment’;
- ISO 14043 (2000 E): ‘Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle Interpretation’.

No Brasil, a pesquisa ainda é muito incipiente. UGAYA (2001) relaciona algumas das poucas entidades que estão envolvidas com a ferramenta de análise de ciclo de vida: o Centro de Tecnologia de Embalagem (CETEA), parte do Instituto de Tecnologia de Alimento (ITAL) em Campinas, para estudos de embalagens e a Mercedes-Benz para análise comparativa de alguns materiais para estofado de bancos de caminhões.

Tanto no Brasil como no resto do mundo, a aplicação do conceito de análise de ciclo de vida aos produtos da biomassa cultivada é bastante recente e quase inexistente em algumas regiões. Isso se deve, certamente, a problemas metodológicos importantes e específicos. Esses problemas estão relacionados: 1) à quantificação das entradas / saídas de superfície agrícola e 2) às dimensões da superfície (parcela, exploração) considerada. Por exemplo, os fluxos nas fronteiras de um sistema agrícola não dependem somente de uma decisão técnica como pode ser

o caso na indústria, mas depende também de fatores aleatórios que são funções das condições climáticas (pluviometria, por exemplo). Este aspecto aleatório pode ser amplificado ou reduzido pelas condições do solo considerado. Deve-se levar em conta a dimensão espacial da produção agrícola que é também fundamental.

3.3 – Metodologias de análise ambiental

A análise de ciclo de vida é mais uma ferramenta entre muitas para análise ambiental. Qual instrumento ou combinação de instrumentos deve ser utilizado em uma particular situação, dependente dos objetivos e do escopo do estudo. Em seguida, é dada uma breve lista das principais ferramentas:

- Avaliação de risco ambiental que envolve a estimação e a avaliação do risco causado ao meio ambiente por uma particular atividade humana;
- Índícios de impactos ambientais são, principalmente, de dois tipos. Primeiramente, são indícios baseados sobre a relação entre a quantidade total de poluentes que saem e a quantidade de produtos obtidos. O segundo tipo de indícios de impactos ambientais é baseado na seleção de um número de parâmetro para os quais são alocados fatores de acordo com seus relativos efeitos ambientais.
- Avaliação de impactos ambientais: é usada para analisar as consequências ambientais de uma específica atividade econômica projetada numa localidade geográfica específica e é indicada para assistir ao decisório para melhor analisar projetos (públicos ou privados). Com base nos resultados da avaliação de impactos ambientais, a autoridade pode decidir a favor ou não de um projeto.
- Avaliação tecnológica: é usualmente descrita como uma ferramenta para avaliar as consequências da introdução de uma nova tecnologia. A metodologia de avaliação tecnológica é relacionada não somente às consequências ambientais, mas também aos efeitos econômicos, legislativos e do uso da tecnologia, entre outros (UNEP, 1996). Em alguns casos, esta metodologia pode estender-se às áreas judiciais e éticas. Em resumo, é uma metodologia destinada ao exame da performance ecológica de uma tecnologia.

- **Análise de custo-benefício:** Um valor econômico é estimado para qualquer perda de qualidade ambiental não contabilizada na estrutura normal de formação de preço de mercado. A análise de custo-benefício permite a seleção de políticas e medidas a partir da avaliação monetária dos custos e benefícios de cada alternativa, selecionando-se aquela(s) que apresenta(m) os benefícios líquidos atualizados positivos mais elevados. Relativamente à componente de custos, é importante distinguir as noções de “custo total” e “custo incremental”, definindo-se este último como os custos que resultam, diretamente, da adoção de uma política ou medida, podendo ser calculados a partir do diferencial entre os custos do “cenário - base” – que traduz a situação sem a implementação (ou alteração) de política – e os do “cenário de política”. Por outro lado, devem também se distinguir “custos sociais” daquelas que afetam apenas um setor/agente e que não representam uma perda para a sociedade, na medida em que induzem apenas uma transferência de rendimentos entre os membros dessa mesma sociedade.

3.4 – Objetivos de uma ACV

A análise do ciclo de vida é uma ferramenta para avaliar as relações ambientais de produtos e atividades através de todas as etapas existentes entre a origem e o retorno ao meio ambiente. Com esta ferramenta é possível identificar as etapas críticas, desenvolver soluções e obter resultados que possam influenciar tanto atividades públicas quanto privadas (WICE, 1994) na:

- exploração global de opção (o estudo de análise de ciclo de vida é realizado para adquirir uma primeira impressão do efeito ambiental de certa opção);
- inovação interna na indústria (o estudo de análise de ciclo de vida é realizado para avaliar o impacto ambiental e estabelecer melhorias nos produtos, no desenvolvimento de novos produtos ou nas inovações técnicas);
- determinação de estratégia (o estudo de análise de ciclo de vida é conduzido para avaliar o impacto ambiental de cenários estratégicos);
- comparação (o estudo de análise de ciclo de vida é realizado para avaliar se um produto ou sistema satisfaz a certos padrões ambientais ou se é mais ecológico optar por outro produto ou sistema);

- afirmação comparativa (reivindicação ambiental relativo à superioridade ou equivalência de um produto contra um produto competitivo que executa a mesma função).

O estudo de análise de ciclo de vida gera informações capazes de:

- Fornecer um quadro tão completo quanto possível das interações de uma atividade com o ambiente;
- Contribuir para a compreensão da natureza de interdependência das conseqüências ambientais associadas às atividades humanas;
- Fornecer aos responsáveis para tomada de decisão informações que definam os efeitos ambientais da atividade, e que permitam identificar as oportunidades para melhoria do desempenho nesse domínio. Neste ponto, os resultados da análise de ciclo de vida podem ser utilizados para desenvolvimento de políticas públicas – regulação mandatária (definição de lei e de padrões);
- Promover o uso eficiente e sustentável de recurso natural;
- Promover uma política preventiva de poluição, bem como a proteção ecológica e de saúde humana.

Em função dos resultados obtidos da análise de ciclo de vida, os responsáveis pela tomada de decisão devem agir levando em consideração as condições de contorno que se colocam, relacionadas ao marketing, à viabilidade econômica, à disponibilidade de tecnologia, entre outros aspectos.

Um exemplo de como a metodologia da análise de ciclo de vida pode ser uma ferramenta de ajuda a decisão é o caso do gás natural. O gás natural tem sido visto como uma fonte de energia mais limpa de que as outras fontes energéticas. Ora, a extração do gás natural e sua purificação são fontes de importantes emissões de dióxidos e de metano. Mas do que isso, ao longo dos gasodutos transcontinentais pode haver freqüentes fugas de gás. Por fim, as centrais térmicas alimentadas ao gás natural produzem gases tóxicos. A amplitude e a esfera destes

impactos são claramente evidenciadas, somente, quando é realizada uma análise de ciclo de vida completa do gás natural.

3.5 – Metodologia de Análise de Ciclo de Vida

A análise do ciclo de vida (ACV) é utilizada com destaque na prevenção da poluição. Na sua aplicação deve-se observar uma seqüência de etapas pré-definidas. De acordo com as séries de normas ISO 14000, mencionadas anteriormente, a avaliação de ciclo de vida completa deve ser executada em quatro etapas cujos componentes estão mostrados na figura 3.2. A figura mostra que os componentes estão relacionados entre si, o que torna a metodologia de análise do ciclo de vida um processo iterativo.

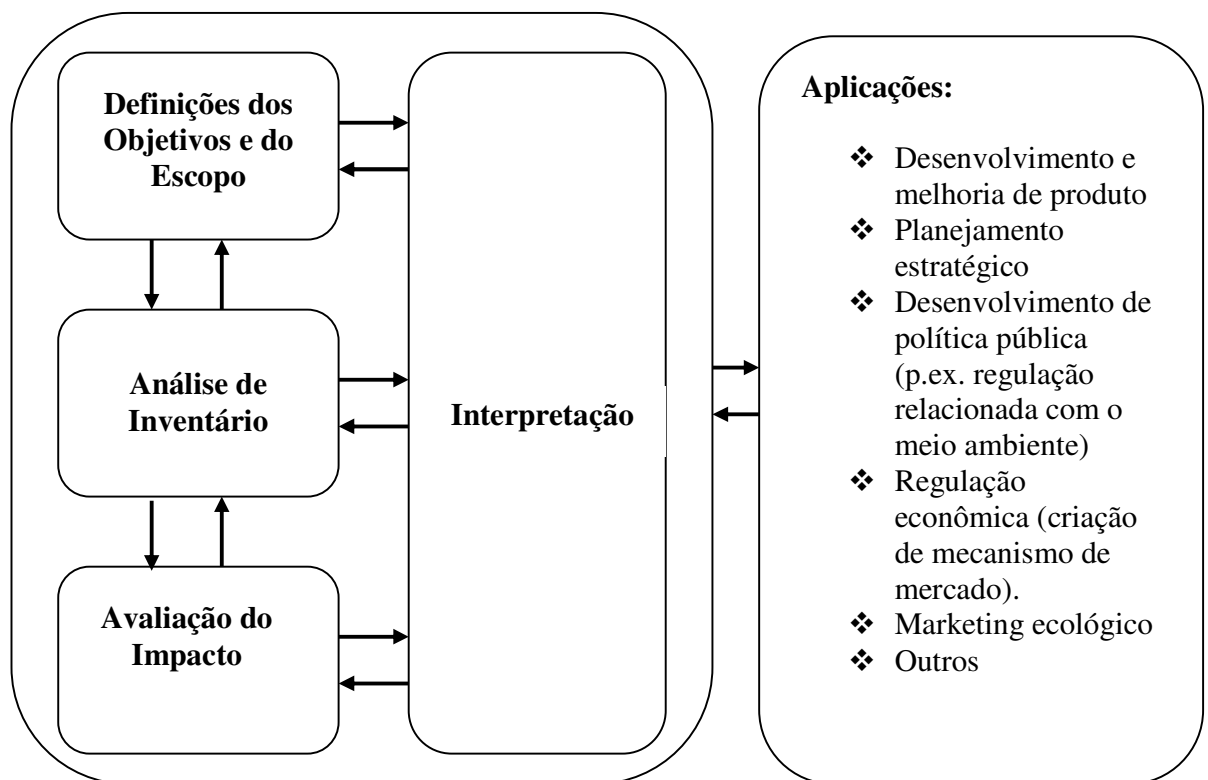


Figura 3.2 – Etapas de uma ACV e suas principais aplicações

Fonte: ISO 14040, 1997E

3.5.1 – Definição dos objetivos e do escopo

A definição dos objetivos e do escopo antecede a aplicação e é a fase na qual é feita a escolha inicial que determinará o plano de funcionamento completo da análise de ciclo de vida. Na definição dos objetivos e escopo, o propósito do estudo e seu âmbito são definidos em relação a como os resultados da análise de ciclo de vida serão usados. Os dados e informações necessários à execução das etapas de inventário e de avaliação de impactos devem ser definidos durante esta fase. Assim, a definição do objetivo do estudo deve constituir uma clara declaração da razão que preside a realização do estudo de análise de ciclo de vida e da futura utilização dos resultados produzidos. O escopo ou âmbito do estudo deve contemplar a definição do sistema, as fronteiras do sistema em estudo, os tipos de dados, as suposições a serem feitas, assim como as limitações a serem consideradas. O escopo deve ser definido com detalhes suficientes que possam assegurar que o alcance e a profundidade da análise sejam compatíveis com o objetivo estabelecido. Em outras palavras, a definição deve ser feita em termos: temporais (tempo de vida do produto; horizonte dos processos e impactos); de extensão espacial (local, nacional, regional continental e global) e das técnicas e nível de sofisticação do estudo em relação aos objetivos. Finalmente, os produtos (ou produto), objetos da análise, são descritos em termos de função, em unidade funcional, em encargos, em impactos e em fluxos de referências.

3.5.1.1 - Função e unidade funcional

A definição clara da unidade funcional é um dos mais importantes elementos de um estudo de ciclo de vida. A unidade funcional descreve a(s) função(ões) primária(s) desempenhada(s) por um sistema de produto e indica quanto destas funções serão consideradas no estudo de análise de ciclo de vida pretendido. A unidade funcional é utilizada como base para selecionar um ou mais sistemas alternativos que podem desenvolver uma mesma função. Por exemplo, na análise de ciclo de vida, não se compara um quilograma de carvão com um quilograma de óleo combustível ou de lenha para a produção de eletricidade, mas sim o quanto é necessário de cada combustível para a produção de 1 kWh elétrico. Ou seja, a unidade funcional permite que sistemas diferentes possam ser tratados como funcionalmente equivalente.

Em resumo, a fase de definição dos objetivos e escopo consiste de uma especificação clara dos objetivos do estudo, da unidade funcional e dos diferentes fluxos que intervêm no sistema produtivo. Por essas razões, HEIJUNGS et al. (1992) considera a definição dos objetivos como parte de uma definição de metas mais amplas, referindo-se a estudos que não somente estabeleçam metas ambientais, mas também metas econômicas, financeiras, sociais (isto é, emprego), segurança do produto, etc.

A ISO 14041, na sua cláusula 5. 2, estabelece a seguinte exigência para a meta do estudo: “A meta de um estudo de análise de ciclo de vida deve declarar, claramente, a intenção do estudo, as razões pelas quais devem realizar-se o estudo. Isto é, para que e para quem são pretendidos os resultados”.

3.5.2 – Análise do Inventário

A análise de inventário é a fase em que o sistema de produto ou sistemas de produto (caso há mais de uma alternativa) é definido. Qualquer produto, serviço ou atividade pode ser representado como um sistema no âmbito da metodologia da análise de ciclo de vida. Um sistema é definido como um conjunto de operações ligadas entre si por fluxos materiais e energéticos (por exemplo: plantio, colheita, transporte, processamento, uso, descarte ou reuso etc.) que desempenha uma função definida. O sistema é separado do meio externo pela fronteira. A análise de inventário é uma descrição quantitativa de todos os fluxos de energia e de materiais através das fronteiras. Nessa fase, é igualmente importante a identificação de todos os dados relevantes sobre os materiais auxiliares, devendo ser seguidos desde a extração das respectivas matérias-primas. Todos os fluxos de saída do sistema e dos subsistemas devem ser seguidos até à sua liberação para o meio ambiente, não esquecendo de incluir no sistema todas as operações de transporte.

A imposição ou a determinação de fronteiras entre o sistema e o meio ambiente é tema de muitos estudos. Alguns desses estudos consideram que o ser humano está incluso no meio ambiente, enquanto outros não. Assim, dependendo da delimitação adotada, um efeito na saúde humana pode ou não estar sendo considerada em uma dada avaliação. Outros exemplos da

dificuldade de impor fronteiras correspondem aos estudos de ciclo de vida de metais e de florestas plantadas. No primeiro caso, se aceita que o estudo comece da obtenção dos recursos do meio ambiente, isto é, a partir da extração do minério, enquanto para as florestas plantadas, o sistema objeto do estudo tem início com o plantio e não com a anterior corte das árvores. O sistema deve ser definido não apenas em termos da função que desempenha, mas também em relação a outros fatores pertinentes como as fontes das entradas, qualquer aspecto específico relativo ao percurso interno, considerações geográficas e enquadramento temporal e, as fontes de dados para o inventário devem ser consistentes com estes fatores.

Na análise de inventário de uma análise de ciclo de vida podemos distinguir três tipos de fronteiras:

- A fronteira entre o sistema produtivo e o sistema ambiental;
- A fronteira entre os processos relevantes e irrelevantes do sistema produtivo (cut-off);
- A fronteira entre o sistema produtivo considerado e outros sistemas produtivos (alocação).

3.5.2.1 - Coleta e qualidade dos dados

A ferramenta de análise de ciclo de vida tende a ser uma metodologia muito intensiva. De fato, uma análise de ciclo de vida pode requerer centenas de milhares de dados. Por isso, o valor e a credibilidade de qualquer análise de ciclo de vida dependerão da qualidade de seus dados. Recentemente, tem aumentado o número de estudo fazendo uso da análise de ciclo de vida, mas muitos desses estudos foram criticados por causa de preocupações sobre os dados utilizados. Estas preocupações vão desde a representatividade dos dados, a idade da tecnologia relacionada aos dados, a perfeição da cobertura dos dados e assim por diante (HELEN, 1996).

Qualidade de dados é definida em função do grau de confiança dos dados de entrada individualmente, do conjunto de dados como um todo e, em última instância, em decisões baseadas no estudo de análise de ciclo de vida que os usa como dados de entrada. A qualidade dos dados é influenciada por fatores como:

- *Fonte dos dados.* Tais fontes podem ser primárias (como dados colecionados em um processo ou planta particular) ou secundárias (como dados de relatórios ou de outras publicações).
- *Nível de agregação*
- *Método de coleta*
- *Idade dos dados*

A qualidade dos dados varia enormemente, principalmente quando cada realizador de um estudo de análise de ciclo de vida tem que coletar seus próprios dados. Como nem sempre se tem acesso a dados industriais (que normalmente são confidenciais) o uso de dados obtidos através de cálculos médios é bastante freqüente. Também, por estas razões, alguns dados que não podem ser achados ou calculados são omitidos. A qualidade dos dados é também função da quantidade de dinheiro e do tempo disponível para a realização do estudo. Uma forma alternativa de contornar estas limitações ao acesso de dados é o estabelecimento de dados públicos por meio eletrônico ou através de publicação de relatório. Por enquanto isso não está acontecendo no Brasil, Contudo, há muitos projetos em desenvolvimento neste sentido na Europa, nos EUA e Canadá. Por exemplo, na Europa um grupo empresarial chamado SPOLD (Sociedade para a Promoção e o Desenvolvimento da Análise de Ciclo de Vida) foi o primeiro patrocinador e coordenador de um projeto desta natureza (HELEN, 1996) cujos objetivos foram:

- Facilitar a disponibilidade e acessibilidade de dados relativos a análise de ciclo de vida;
- Aumentar a confiabilidade, a comparabilidade e a compatibilidade dos resultados de estudos de análise de ciclo de vida.

Qualidades dos dados são normalmente determinadas em termos de indicadores específicos que podem ser qualitativos ou quantitativos. Estes indicadores são escolhidos de acordo com o propósito da análise de ciclo de vida e a metodologia particular escolhido para o estudo. A tabela 3.1 oferece alguns destes indicadores.

Tabela 3.1 – Indicadores de qualidade de dados em ACV

Indicador quantitativo	Indicadores qualitativos
Precisão	Consistência
Perfeição	Aplicabilidade / conveniência
Distribuição	Comparabilidade
Homogeneidade	Representatividade
Estruturas de correlação	Identificação de anomalias
Incerteza	Reprodutibilidade
	Acessibilidade / disponibilidade

Fonte: SETAC, 1994, Elaboração própria.

Os dados devem ser preferencialmente, obtidos a partir das unidades que operam os processos específicos. E, quando este tipo de dados não é disponibilizado é necessário recorrer a outras fontes. Estas podem ser: cálculos baseados na química e tecnologia do processo, estimativas baseadas em operações similares, bibliografia, bases de dados comercialmente disponíveis e padrões de consumo dos produtos. Entretanto, deve-se mencionar qual a origem dos dados.

De modo a compilar os dados de entrada e de saída é necessário, algumas vezes, decompor o sistema em séries de operações interligadas ou subsistemas. O grau de subdivisão do sistema total em operação unitária é freqüentemente determinado pela qualidade e disponibilidade dos dados, devendo ser estabelecido na fase inicial.

3.5.2.2. – Alocação

Em muitas situações, os subsistemas de inventário originam mais de um produto ou subproduto, pelo que estes podem ser reintroduzidos na cadeia de produção, ou constituírem matéria-prima em outros sistemas. Assim, é necessário estabelecer e aplicar um método consistente de atribuição de cargas aos diferentes materiais e produtos gerados pelo sistema em

estudo, independentemente do tratamento dos poluentes emitidos pelos diferentes subsistemas poder ser feito de um modo global.

Alocar consiste em realizar um procedimento de repartição da responsabilidade dos impactos ambientais entre os diversos produtos, materiais ou processos, que se faz necessária devido à variedade de componentes que estão entrando ou saindo do sistema, subsistema ou processos. A alocação pode ser realizada através de métodos baseados em características físicas (por exemplo, relação mássica), parâmetros econômicos (custo ou preço do produto) ou outras que sejam adequados ao objeto do estudo. É, neste contexto, que para efeito de inventário, as operações envolvidas na produção e na conversão de energia são consideradas como parte integrante do sistema em estudo. HEIJUNGS et al. (1992) e BÖHM & WALZ (1996) afirmaram que não há um método único para o processo de alocação.

O principal resultado da fase de análise de inventário é uma tabela de inventário em que são listadas as quantidades de insumo e energia introduzidas nos processos, as quantidades produzidas e as emissões para o ambiente associado com a unidade funcional, em termos de quilograma de dióxido de carbono, miligrama de fenol, metros cúbicos de gás natural, etc.

3.5.3 – Análise de impactos

De acordo com a ISO 14040 (1997E), a análise de impacto, a terceira fase numa avaliação de ciclo de vida, “identifica e avalia a magnitude e significado dos potenciais impactos ambientais de um sistema produtivo”. Similarmente o WIA-1, primeiro SETAC – Grupo de Trabalho Europeu sobre Avaliação de Impactos, define a análise de impacto na análise de ciclo de vida como um processo quantitativo e/ou qualitativo para caracterizar, classificar e avaliar/ponderar os potenciais impactos das intervenções ambientais identificadas na análise de inventário (UDO de HAES, 1996).

A análise de impactos consiste de três etapas distintas: classificação, caracterização (incluindo a normalização) e avaliação (CONSOLI et al., 1993). A seguir, esses elementos são discutidos.

3.5.3.1 – Classificação

A classificação é um passo qualitativo baseado na análise científica de processos ambientais relevantes. Na etapa de classificação, os recursos usados e resíduos gerados são agrupados em categorias de impactos baseadas nos seus efeitos antecipados sobre o meio ambiente. Essas categorias de impactos podem incluir problemas ambientais tais como depleção de recurso bióticos e abióticos, a destruição da camada de ozônio, o aquecimento global, a acidificação, a formação de agentes fotoquímicos, a toxicidade humana e ecológica, eutroficação (aumento excessivo de nutriente na água, especialmente fósforo e nitrato, o que provoca crescimento exagerado de certos organismos), efeitos radiativos, dispersão de calor, ruídos, odores, desertificação, degradação física do ecossistema, etc.

Com a classificação determina-se a que categorias de impacto serão as entradas e saídas definidas pelo inventário. Exemplificando: emissões gasosas podem ser consideradas como perturbadoras da camada de ozônio ou classificadas como causadoras de chuva ácida. Podendo também um único poluente ser classificado em mais de uma categoria, como os NO_x que podem causar acidificação e também participar na formação da neblina fotoquímica.

GUINÉE (1995), LINDFORS et al. (1995), UDO de HAES. (1996) e WENZEL et al. (1997) no processo de classificação questionaram às emissões químicas com múltiplos impactos e juntos chegaram a distinguir quatro categorias de emissões:

- Emissões com impactos paralelos, isto é, emissões de substâncias que podem contribuir, teoricamente, com mais de uma categoria de impacto, mas em prática só contribui para um, por exemplo, uma emissão de SO₂ que pode ter impactos de toxicidade ou acidificação.
- Emissões com impactos consecutivos, isto é, emissões de substâncias que podem em prática ter impactos sucessivos, por exemplo, emissões de metais pesados que pudessem, primeiramente, ser eco-tóxico e subsequente, por cadeias alimentícias, ter impactos na saúde humana.
- Emissões com impactos indiretos, isto é, emissões de substâncias que têm impactos primários que conduzem a impactos secundários, por exemplo, a toxicidade do alumínio induzido a acidificação, ou do metano que contribui para formação de elementos

fotoquímicos, e o ozônio produzido contribui na mudança climática que, por sua vez, pode contribuir para depleção de ozônio estratosférico.

- Emissões com impactos combinados, isto é, emissões de substâncias que têm uma influência mútua. Para emissões que, geralmente, têm impactos combinados, a literatura recomenda introduzir suposições relativas a concentrações das outras substâncias pertinentes.

3.5.3.2 – Caracterização, normalização e avaliação

A caracterização é, principalmente, um processo quantitativo no qual a contribuição relativa de cada entrada e saída para cada categoria de impactos selecionada, levando-se em conta a sua magnitude e seu potencial, são estimadas (MOHIN, 1994). São vários os métodos disponíveis para a realização da caracterização, sendo que o uso de fatores de equivalência que permite a atribuição de pesos relativos (ponderação) às contribuições das diferentes categorias de impactos, de modo a que possam ser comparadas entre si, é o mais comum. Os fatores de equivalência indicam o quanto contribui uma substância de uma dada categoria de impacto comparada com uma substância de referência. Por exemplo, a substância de referência para o aquecimento global é o dióxido de carbono; a contribuição no aquecimento global para uma outra substância é então expressada em termos de quantidade de dióxido de carbono equivalente que deve oferecer o mesmo efeito de aquecimento global.

Um desenvolvimento posterior às etapas de classificação e de caracterização é a normalização dos dados agregados por categorias de impactos relativamente à amplitude e área. Tal procedimento facilita a comparação de dados de impactos e fornece uma base de dado mais adequada para realização da avaliação desses impactos.

3.5.4 – Interpretação ou análise de melhorias

É a fase, na qual, os resultados da análise e todas as escolhas e suposições feitas no decorrer da análise são avaliadas em termos de solidez e robustez, e conclusões globais são tiradas. Os elementos principais dessa fase de interpretação são compostos de uma avaliação de

dados ou de resultados (em termos de consistência e perfeição), de uma análise de sua robustez, e da formulação de conclusões e recomendações do estudo.

Apesar da inexistência de uma metodologia definida, a melhoria ambiental tem ocorrido, quase sempre, quando uma tentativa de avaliação do ciclo de vida é efetuada. A realização do inventário, como foi descrito, já é suficiente para que sejam levantados processos ou características de um produto que possam ser modificados para um ganho ambiental, mesmo sem a realização da análise de impacto.

3.5.4.1 – Consistência

O objetivo de conferir a consistência é verificar se as hipóteses, métodos, modelos e banco de dados são consistentes com os objetivos e âmbito do estudo e com as várias alternativas consideradas. Deve-se deixar claro que toda análise de resultados e análise de sensibilidade é fútil se as hipóteses e modelos considerados na análise de ciclo de vida são incompatíveis com os objetivos e âmbito do estudo, ou incompatíveis com as várias opções alternativas. E caso haja diferenças entre funções que executam dois sistemas produtivos ou alternativos, estas diferenças devem ser justificadas ou corrigidas. A influência de diferenças que não podem ser corrigidas ou justificadas deve ser determinada e discutida na análise de sensibilidade.

3.5.4 2 – Perfeição

A perfeição assegura que as informações e dados sejam pertinentes e necessários para a fase de interpretação e estejam disponíveis e completos. Na verificação de erro, o estudo é conferido em relação às suposições, escolha de modelo e dados. Isso porque, um olhar especialista aos resultados da análise de ciclo de vida e como eles foram gerados pode revelar erros e dados incompletos e, ainda, conferir a metodologia usada nas diferentes fases do projeto, os parâmetros que descrevem o sistema, os resultados e conclusões da análise em relação aos objetivos e âmbito do estudo.

3.5.4.3 - Análise de contribuição

A análise de contribuição calcula a contribuição global para os resultados dos vários fatores. As contribuições, normalmente, são expressas como porcentagens do total. A análise de contribuição fornece informações sobre os fluxos ambientais específicos, processos ou impactos para um determinado risco ambiental, possibilitando tomadas de decisões.

As contribuições globais, no resultado obtido da análise de ciclo de vida podem ser calculadas em diferentes níveis:

- Ao nível de resultados da ponderação;
- Ao nível de resultados dos indicadores e/ou resultados normalizados dos indicadores;
- Ao nível de resultados de inventário, isto é, emissões ou extrações de recurso.

3.5.4.4 - Análise de perturbação

Análise de perturbação envolve o estudo dos efeitos de pequenas mudanças dentro do sistema nos resultados de uma análise de ciclo de vida. São calculados os efeitos destas pequenas mudanças simultaneamente para todos os fluxos do sistema, inclusos fluxos econômicos. A análise pode ser realizada em diferentes níveis de agregação: tabela de inventário, indicador de resultado, indicador de resultado normalizado ou ponderação de resultados. A diferença principal entre a análise de contribuição e a análise de perturbação reside no fato que a última não só leva em conta os fluxos ambientais, mas também os fluxos econômicos existentes entre as diferentes unidades do processo. A análise de perturbação pode ser muito importante em uma análise de melhoria e em uma análise de sensibilidade permitindo a identificação de pontos importantes e refinar o estudo de uma análise de ciclo de vida.

3.5.4.5 - Análise de sensibilidade e incerteza

Para usar a metodologia de análise de ciclo de vida como uma ferramenta de ajuda na decisão, é preciso dar informação sobre a robustez dos resultados^{3.2}. Este elemento da fase de

^{3.2} Na análise de perturbação, todos os parâmetros de sistemas (dados de processo, fator de caracterização, etc.) são sucessivamente trocados (i. e. 1 %) e a mudança resultante em um sistema de produção (emissão, resultado de indicador de categoria, etc.) são observados. A relação entre esses é o multiplicador. Conseqüentemente, se uma

interpretação avalia a influência de variações nos dados do processo, da escolha do modelo e outras variáveis nos resultados. Na análise de sensibilidade, estas mudanças são introduzidas deliberadamente para determinar a robustez dos resultados com respeito a essas variações. A análise de incerteza usa dados empíricos sobre grau de incerteza de dados específicos para calcular o intervalo de erro total dos resultados.

3.6 - Limitações

A análise de ciclo de vida é uma dentre as várias técnicas existentes de gestão ambiental, sendo que nem sempre esta ferramenta é a mais apropriada para o uso em todas as determinadas situações. Entretanto, esta ferramenta tem algumas limitações que devem ser consideradas e estendidas ao desenvolvimento de um estudo:

- Restrições por confidencialidade;
- Questões de inconsistência de dados: tipo de dados, agregações, média por indústria específica;
- Questão local muitas vezes não é apropriada, para umas aplicações regionais ou globais;
- Falta de acordo sobre as questões de valorização;
- Em determinados problemas, a ACV pode não abranger todos os aspectos ambientais, devendo ser utilizado com a combinação de outras ferramentas (análise de risco, auditoria ambiental e outros);
- Nos aspectos subjetivos as escolhas feitas no processo de ACV, tais como: definição dos limites, seleção dos dados e categoria dos impactos ambientais, escolha dos métodos de cálculos para a caracterização de impacto, etc.

diminuição de 1% na entrada de combustível em um processo de produção conduz a diminuição de 3% na emissão de CO₂, é dito que o multiplicador é 3.

Capítulo 4

Experiências de queima de capim elefante para a produção de tijolos

Os dados obtidos correspondem com os resultados da realização de testes “a frio” e a “quente”, da avaliação da eficiência energética de um forno intermitente para a produção de tijolos usando biomassa (cavaco de madeira e Capim Elefante). Os testes foram realizados na empresa Cerâmica Nossa Senhora Auxiliadora, localizada no município de Vinhedo – São Paulo. O teste “a frio” avaliou a capacidade e o desempenho operacional do sistema de alimentação comumente utilizado nestas indústrias. O teste “a quente” avaliou a manutenção da temperatura requerida na saída da fornalha com alta eficiência da combustão quando é usado Capim Elefante como combustível.

O sistema de alimentação foi estudado detalhadamente empregando-se inicialmente como matéria-prima cavaco de madeira e depois Capim Elefante pré-condicionado. Foram obtidas informações técnicas relacionadas com as características construtivas e operacionais do sistema de alimentação avaliado.

O sistema de alimentação utilizado nestes testes foi construído pela empresa Irmãos Lippel e Cia Ltda em Agrolândia, Santa Catarina. É composto basicamente de um silo de estocagem de secção cônica, na parte inferior do qual se encontra uma rosca-sem-fim para o transporte e injeção do material sendo alimentado na câmara de combustão. O diâmetro da rosca-sem-fim é de aproximadamente 200 mm e do duto por onde a rosca se movimenta de aproximadamente 260 mm. A rosca-sem-fim é de passo constante e comprimento aproximado de 1.300 mm. A sua movimentação é feita através de transmissão por meio de polia e correia,

reductor de velocidade e motor elétrico. O motor elétrico tem uma potência de 1 CV, velocidade de rotação de 1750 r.p.m., e frequência de 60 Hz. O conjunto de transmissão de potência é também composto por 4 polias de tamanhos diferentes, o que possibilita uma transmissão com velocidade variável. Um braço de tamanho regulável acoplado a um disco de 340 mm de diâmetro permite variar a velocidade da rosca-sem-fim através da variação da excentricidade do braço em relação ao disco. Com isto é possível variar então a velocidade de rotação da rosca-sem-fim e também da taxa e frequência de alimentação.

4.1 - Caracterização do Capim Elefante

4.1.1 - Densidade a granel

O Capim Elefante é um sólido poroso, portanto, possui densidade real ou da fibra, a qual considera o volume realmente ocupado pelo sólido, densidade aparente de partícula, que considera o volume aparente, ou seja, o sólido e os poros, e a densidade aparente do material amontoado ou a granel, que leva em conta os vazios existentes entre as partículas quando estas são colocadas formando uma camada como no momento da alimentação por silo e na queima em grelha fixo.

Pelas suas próprias características físicas, o capim elefante “solto” é um material de baixa densidade energética, quando comparado com a lenha, sendo muita baixa a sua densidade a granel. Além do que, este material é de difícil escoamento durante a sua alimentação através de sistema que usam silos.

Durante a realização dos ensaios “a frio” com o sistema de alimentação foram coletadas algumas amostras de cavacos de madeira e de Capim Elefante, visando-se a determinação da sua umidade e densidade a granel (*bulk density*).

A realização destas análises foi baseada nas normas existentes da *ASTM* para biomassa, norma *E 871-82* para a análise de umidade e norma *E 873-82* para a análise de densidade a granel. Os valores obtidos de densidade a granel para o capim elefante variam na faixa de 45 a

65 kg/m³, para uma umidade em torno de 10,5 % (b.u), e de aproximadamente 280 kg/m³ no caso do cavaco de madeira para uma umidade em torno de 49 % (b.u).

Observa-se a baixa densidade a granel do capim elefante nas condições como sendo colocado no silo do sistema de alimentação, quando comparado com o cavaco de madeira, fato relevante relacionando posteriormente com a sua grande dificuldade de escoar livremente no silo e de manter sempre “cheia” a rosca-sem-fim de transporte e injeção do material ao forno.

Como o Capim Elefante apresenta em sua morfologia fibras longas e entrelaçadas, com partículas de variados tamanhos, no seu teste “a frio” o material se mostrou como um sólido complexo, em termos de propriedades de transporte, e, por isto, cuidados especiais devem ser considerados para alcançar um conjunto de alimentação prático, funcional, técnica e economicamente viável.

4.1.2 - Análise química imediata

A análise química imediata de um combustível qualquer oferece as frações em peso de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo da amostra. A análise imediata foi efetuada segundo as normas correspondentes da ASTM para madeira e resíduos, norma E 872 e E 897 para determinação do teor de carbono fixa, norma E 871 para determinação do teor de umidade, normas E 830 e E 1102 para determinação do teor de cinza e normas E 872 e E 897 para determinação do teor de materiais voláteis.

Os resultados da análise química imediata para o Capim Elefante são confrontados com os do bagaço e da palha de cana-de-açúcar e reportados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Resultados da análise imediata para o Capim Elefante, bagaço e palha da cana-de-açúcar.

(%)	Capim Elefante	Bagaço de cana	Palha de cana
Umidade	10,3	10,5	10,2
Carbono fixo	16,4	16,1	16,3
Materiais voláteis	61,8	69,3	66,4
Cinzas	11,5	4,1	7,1

Observa-se que o capim elefante apresenta teor de cinza muito maior àqueles do bagaço e palha de cana-de-açúcar. Isto se justifica pelas altas doses de adubação nitrogenada (50 a 400 kg N/ha/ano) praticadas na produção do material seco de capim elefante.

4.1.3 - Análise química elementar

A análise química elementar realizada pela Central Analítica do Instituto de Química da UNICAMP fornece os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio de uma amostra de capim elefante em estudo. As análises foram realizadas na base das normas E 777 para determinação dos teores de carbono e hidrogênio e E 778 para teores de nitrogênio. Foi utilizado um analisador CHN Perkin Elmer, series II 2400.

Tabela 4.2 - Composição química elementar do capim elefante comparado com bagaço e palha de cana-de-açúcar

(%)	Capim elefante	Bagaço de cana	Palha de cana
Carbono	41,2	46,7	43,4
Hidrogênio	5,6	5,9	5,7
Nitrogênio	1,8	0,9	1,2
Oxigênio (por diferença)	51,4	46,5	19,7

4.1.4 - Análise do teor de lignina

A análise do teor de lignina em materiais orgânicos resulta uma informação interessante, particularmente quando se trata de estudos de processos onde o material é submetido a aquecimento, visando-se levantar dados da sua decomposição térmica no tempo.

A análise do teor de lignina para o Capim Elefante foi realizada no Laboratório de Celulose e Papel do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. O método de análise utilizado foi o método de Klason baseado em modificações do método padrão (GOMIDE e DEMUNER, 1986).

Na Tabela 4.3 são reportados os resultados das determinações do teor de lignina no Capim Elefante e da palha de cana-de-açúcar. A lignina é um polímero natural presente, em maior ou menor quantidade, nos materiais lignocelulósicos. É o componente da biomassa que

mais resistência oferece à decomposição térmica, pelo que às temperaturas em que se verifica o processo de devolatilização. O conhecimento do teor de lignina na biomassa é um resultado importante para a análise do processo de devolatilização ou pirólise.

Tabela 4.3 - Resultados do teor de lignina no capim elefante e na palha de cana-de-açúcar

Lignina, %				
Amostras	Repetição	Insolúvel*	Solúvel**	Total
Capim Elefante	A	25,9	1,5	27,4
	B	26,0	1,5	27,5
		26,0	1,5	27,5
Palha de cana	A	20,3	2,6	22,9
	B	20,8	2,6	23,4
		20,6	2,6	23,2

*GOMIDE e DEMUNER (1989)

**GOLDSCHMID (1971)

4.1.5 - Poder calorífico superior

A determinação do poder calorífico superior de amostras de capim elefante foi realizada utilizando-se a técnica da bomba calorimétrica. Foi empregado o calorímetro isotérmico do Laboratório de Combustíveis e Combustão do Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, e procedimento experimental descrito pela norma E 711-87.

Neste tipo de ensaio uma amostra de aproximadamente 1 grama de peso é queimada no interior da bomba do calorímetro com atmosfera de oxigênio sob alta pressão (aproximadamente 2.549 kPa).

O poder calorífico superior do combustível seco obtido experimentalmente através de ensaios de laboratório, pode ser convertido a poder calorífico superior (base úmida) e poder calorífico inferior (base úmida) através de métodos analíticos.

A equação utilizada, neste trabalho, para determinar o poder calorífico inferior (base úmida) do capim elefante, a partir do poder calorífico superior (base seca) obtido por meio de ensaios de laboratório e cálculo posterior, é a equação reportada por MAKRAY (1984). Nesta equação é descontado do poder calorífico superior (base seca), a água da biomassa, a energia necessária para vaporizar essa água e o calor latente de vaporização da água formada na combustão. A equação é a seguinte

$$PCI(b.u.) = PCS(b.s.)(1 - U/100) - 22,1H - 0,442[(U/18) - (HU/2)]$$

onde:

PCI está em MJ/kg;

H é a fração em peso de hidrogênio na biomassa seca;

U é a umidade em % (base úmida) da biomassa;

PCS (b.s.) é o poder calorífico superior da biomassa (base seca).

4.1.5 - Análise termogravimétrica

A análise térmica é a análise do comportamento físico de uma substância, bem como das transformações químicas que podem ocorrer, através de um processo de aquecimento ou resfriamento da amostra. Neste caso, a perda de massa da amostra é registrada no tempo em função da temperatura.

As análises de termogravimétrica para as amostras de capim elefante foram realizadas na Central Analítica do Instituto de Química da UNICAMP, Campinas, São Paulo.

O equipamento utilizado para estas análises foi o Universal V2.3C TA Instruments. O procedimento utilizado na análise foi: partiu-se da temperatura ambiente e aqueceu-se até 1000°C com rampa de aquecimento de 20°C/min (ou 20K/min), sob atmosfera oxidante, houveram também resultados em atmosfera inerte.

De posse dos resultados da análise térmica se determinou os parâmetros cinéticos com base no modelo cinético de Arrhenius. O fundamento teórico do método e parâmetros cinéticos para as biomassas avaliadas é apresentado por SEYE (2000).

As análises aqui apresentadas correspondem com as curvas de TG e DTG (análise termogravimétrica e diferencial termogravimétrica), realizadas em atmosfera oxidante e inerte.

Nas Figuras 4.1 a 4.6, são mostrados alguns dos termogramas obtidos para diferentes biomassas ensaiadas, incluindo-se o capim elefante. A curva de DTG (Diferencial Termogravimétrico) permite separar as diferentes etapas pelas quais atravessa a amostra, devido a que as mesmas aparecem representadas na forma de picos, à área abaixo dos quais, é proporcional à variação absoluta da amostra.

De forma geral pode-se observar que, no três casos avaliados, onde se variou a taxa de aquecimento (em 20, 60 e 100 K/min) mantendo-se constante o diâmetro de partícula e as condições operacionais do ensaio, praticamente o comportamento foi similar, ocorrendo só um leve deslocamento dos picos. Segundo a análise das curvas de perda de massa (TG) e a curva diferencial (DTG), até a temperatura próxima de 250°C, ocorre uma leve variação do peso devido à saída da umidade livre da amostra (da ordem de 5% do peso inicial da amostra). Isso caracteriza o primeiro pico observado na curva DTG. Já entre 250°C e 400°C observa-se um grande aumento na taxa de perda de massa, isto provocado pelo crescimento acelerado da destruição dos enlaces estáveis da celulose e hemicelulose basicamente, produzindo-se a saída fundamental dos voláteis.

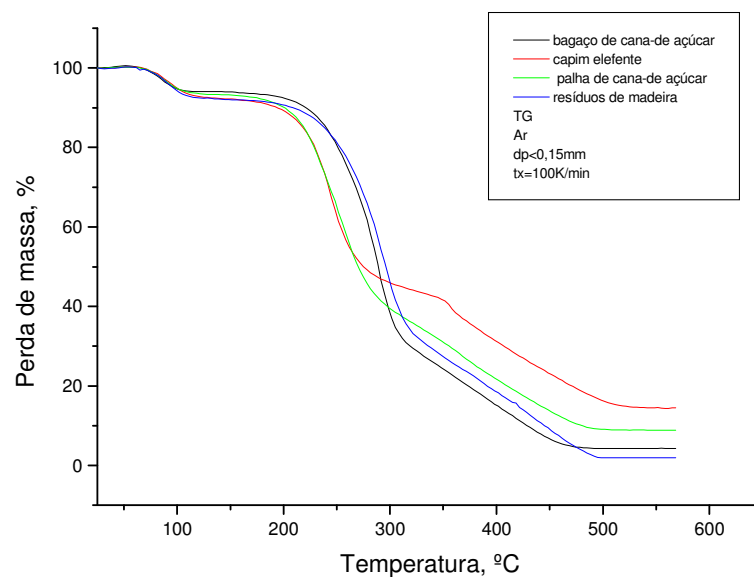


Figura 4.1 - Curvas TG para diferentes condições e espécies (100k/min)

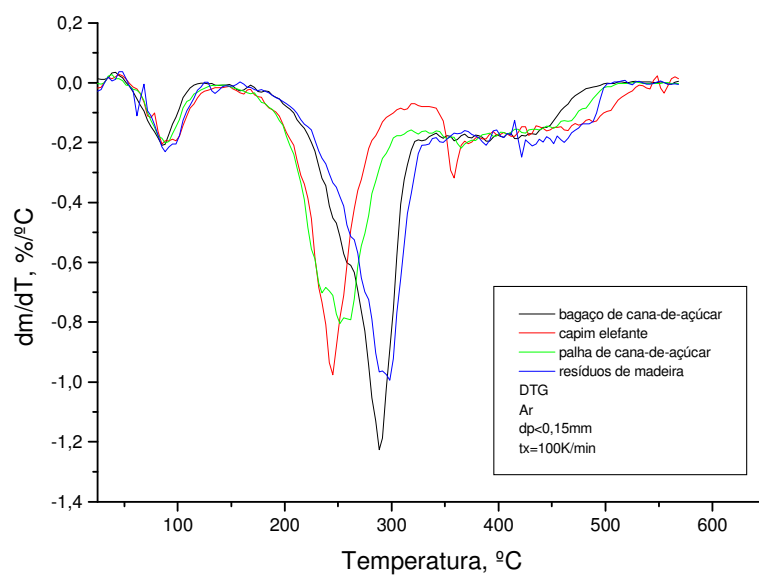


Figura 4.2 - Curvas DTG para diferentes condições e espécies (100K/min)

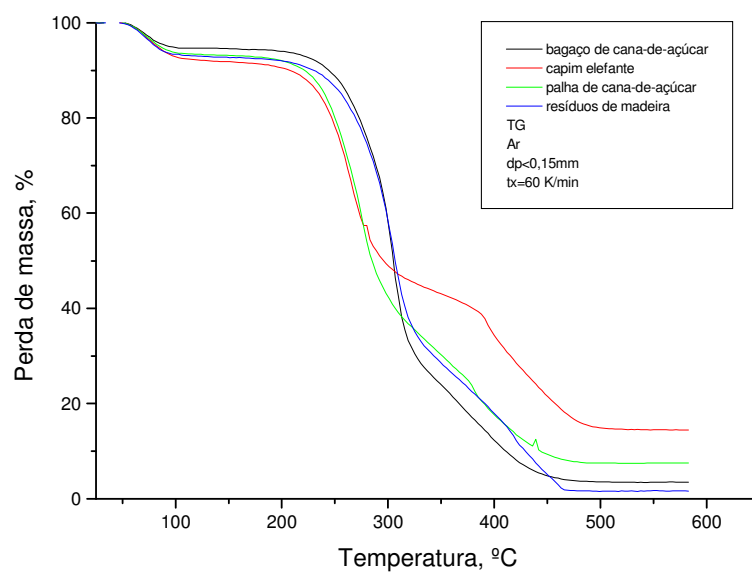


Figura 4.3 - Curvas TG para diferentes condições e espécies (60K/min)

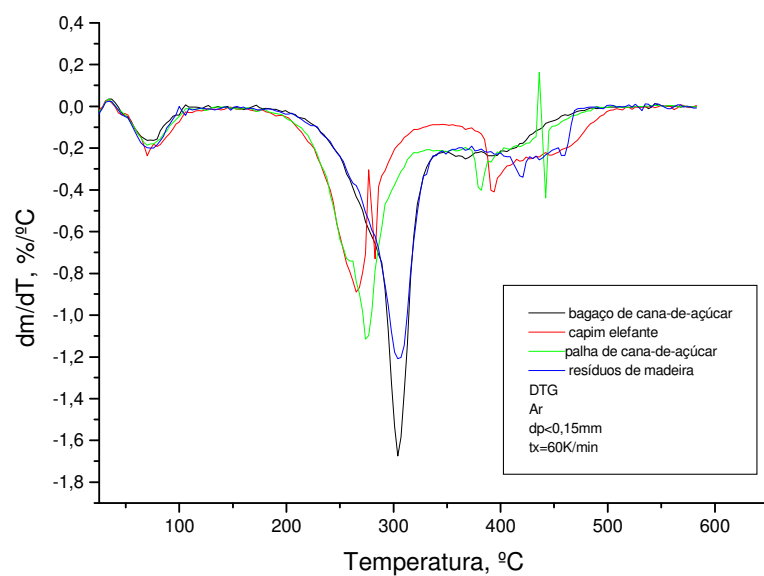


Figura 4.4 - Curvas DTG para diferentes condições e espécies (60K/min)

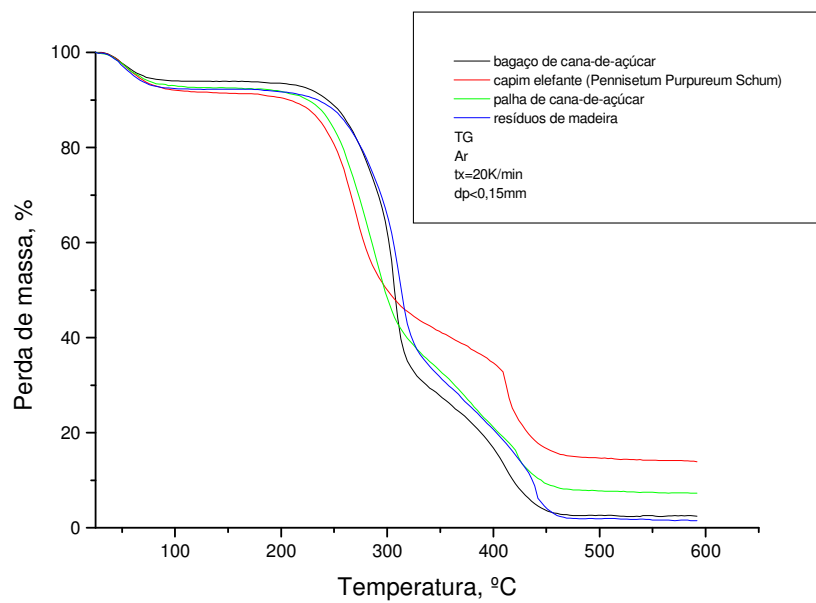


Figura 4.5 - Curvas TG para diferentes condições e espécies (20K/min)

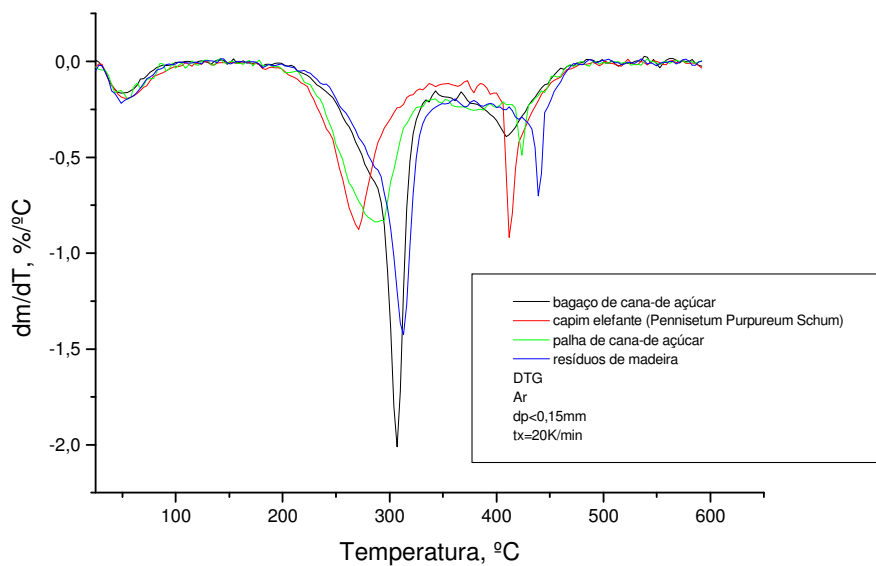


Figura 4.6 - Curvas DTG para diferentes condições e espécies (20K/min)

Alguns detalhes importantes a destacar são os seguintes:

- Quanto maior for a taxa de aquecimento o ponto de máximo desprendimento de voláteis ocorrerá a uma menor temperatura;
- Materiais com maior teor de voláteis têm a máxima taxa de devolatilização a temperaturas mais baixas;
- Materiais com maior teor de cinzas na sua composição química têm o máximo desprendimento de voláteis a temperaturas mais elevadas. Isto se deve ao fato de que quando existe maior teor de matéria inorgânica existe maior possibilidade do material orgânico estar diluído com o material inorgânico, existindo então um retardamento da transferência de calor no interior das partículas e conseqüentemente a difusão dos voláteis para fora da partícula;

Em análises deste tipo se considera que a temperatura média de reação é aquela onde são liberadas as maiores quantidades de voláteis.

4.2 - Resultados dos testes de alimentação usando cavacos de madeira e Capim Elefante

Os testes “a frio” do conjunto de alimentação tinham por objetivo avaliar o desempenho deste equipamento quando trabalhando com Capim Elefante e cavaco de madeira, constituindo-se este último numa referencia para a nossa discussão. O estudo do desempenho do sistema considerou a sua operação em dois regimes de velocidades de rotação da rosca-sem-fim de transporte e injeção do combustível ao forno. As velocidades de rotações ensaiadas foram de 2 r.p.m. (mínima), velocidade comumente utilizada durante a operação normal dos fornos com cavaco de madeira, e de 4 r.p.m., máxima velocidade permissível nos ensaios realizados.

Numa primeira parte do teste foi ensaiado o sistema usando-se cavacos de madeira. Como relatado anteriormente, o cavaco de madeira devido principalmente a sua relativa densidade a granel, apresenta bom comportamento físico durante o seu escoamento em silos. Este comportamento é bem conhecido e foi observado durante este trabalho, sendo que os alimentadores, durante a operação corrente do forno, são carregados de forma contínua na medida em que vão se esvaziando, não se precisando necessariamente de operações manuais

adicionais no alimentador para melhorar o seu desempenho. Numa “fornada” um operário só é o suficiente para garantir a operação de carregamento dos alimentadores com cavacos de madeira.

Os ensaios com cavacos de madeira foram realizados a velocidade de rotação da rosca-sem-fim de 2 r.p.m., a qual era a recomendada segundo as informações oferecidas pela própria empresa Cerâmica Nossa Senhora Auxiliadora. Foram registrados dados da vazão mássica de material, velocidade de rotação da rosca-sem-fim e frequência da alimentação. O ensaio teve também como objetivo a avaliação do desempenho operacional do sistema de alimentação, bem como sua flexibilidade e funcionalidade, ambas durante uma recarga do silo de estocagem e observada a capacidade efetiva de entrega da rosca-sem-fim.

Para tanto, determinou-se a quantidade de material descarregado pela rosca-sem-fim num período de tempo de 1 minuto. Ao mesmo tempo era retirada uma amostra deste material para posterior determinação do teor de umidade e densidade a granel. Os resultados experimentais foram estudados estatisticamente pelos intervalos de confiança com aplicação do teste “t” de Student para médias com nível de significação de 5 %. Na tabela 4.4 mostra-se a análise estatística para os testes com cavacos de madeiras.

Tabela 4.4 - Análise estatística das variáveis estudadas - Cavaco de madeira

Variáveis estudadas	Média	Desvio padrão	Intervalos de confiança	
			Limite inferior	Limite superior
Vazão (kg/h)	183,6	4,1	176,8	190,4
Densidade (kg/m ³)	286,5	2,9	281,6	291,4
Umidade (% base úmida)	49,1	2,1	47,1	51,1

A análise estatística realizada para a condição de operação do sistema de alimentação com cavacos de madeira mostrou-se satisfatório. O que demonstra a viabilidade e o bom desempenho operacional. A capacidade de entrega reflete um desvio padrão maior

provavelmente devido a erros sistemáticos derivados do próprio funcionamento cíclico ou intermitente da rosca-sem-fim. Já as análises laboratoriais de densidade a granel e umidade do material apresentam resultados bem mais compatíveis.

Numa segunda parte dos testes, 3 fardos de capim elefante foram previamente desfeitos e adequadamente misturados, sendo imediatamente carregado o silo de estocagem do alimentador com este material, da mesma forma como foi carregado o silo com os cavacos de madeira.

Em seguida foi acionando o motor elétrico do sistema de alimentação e colocado o mesmo em regime de operação, a uma velocidade de rotação da rosca-sem-fim de aproximadamente de 2 r.p.m. alguns segundos após o início da alimentação foram coletadas as amostras de material “solto” em sacos plásticos para posterior pesagem, e cronometrado durante 1 minuto. Foram também retiradas amostras para análises de densidade à granel e umidade do material.

Na tabela 4.5 estão os resultados da análise estatística das variáveis medidas durante os testes com Capim Elefante.

Tabela 4.5 - Análise estatística da variável vazão mássica para Capim Elefante e com velocidade de rotação da rosca-sem-fim de 2 r.p.m.

Variáveis estudadas	Média	Desvio padrão	Intervalos de confiança	
			Limite inferior	Limite superior
Vazão (kg/h)	27,2	11,8	7,3	47,1
Densidade (kg/m ³)	55,7	7,1	51	60,4
Umidade (% base úmida)	10,5	0,2	10,3	10,7

Uma análise destes dados mostra resultados satisfatórios e coerentes no que diz a respeito às variáveis de densidade a granel e umidade do Capim Elefante. Os valores de densidade

estimados foram comparados com os valores publicados em outros trabalhos para bagaço e palha de cana (OLIVARES, 1996 e NEIVA, 1998).

A vazão mássica de capim elefante descarregado pelo rosca-sem-fim, porém, reflete em primeiro lugar, um valor muito baixo em comparação com o cavaco de madeira, o que já era de se esperar considerando que o teste foi realizado à mesma velocidade de rotação da rosca-sem-fim, e a diferença de densidade entre ambos os materiais lignocelulósicos é significativa. Em segundo lugar se observa um desvio padrão quase igual a 2 vezes o valor médio desta variável, o que é resultado da operação instável da rosca-sem-fim de alimentação, motivado pelos problemas já conhecidos de formação de arcos no silo de estocagem, e conseqüentemente, da instabilidade na vazão de material sólido sendo descarregado.

Os testes também mostraram que com o incremento da velocidade de rotação da rosca, há um aumento, quase proporcional, na vazão mássica de capim elefante. Porém, os valores são ainda muito baixos quando comparado com os valores obtidos para cavacos de madeira, o que nestas condições, resulta inviável a operação do forno.

Tabela 4.6 - Análise estatística da variável vazão mássica para capim elefante e com velocidade de rotação da rosca-sem-fim de 4 r.p.m.

Variáveis estudadas	Média	Desvio padrão	Intervalos de confiança	
			Limite inferior	Limite superior
Vazão (kg/h)	54	4,2	35,2	72,8
Densidade (kg/m ³)	55,7	7,1	51	60,4
Umidade (% base úmida)	10,5	0,2	10,3	10,7

Neste trabalho, um dos objetivos é estudar a viabilidade técnica de utilizar o capim elefante na indústria de cerâmica vermelha, de maneira que ela se constitua numa fonte alternativa atrativa, sobretudo, em regiões onde os custos com os suprimentos em combustíveis mais comumente utilizados, a lenha e os resíduos de madeira sejam tal que permitam que o

capim elefante possa-se inserir no mercado de combustíveis para a produção de tijolos, entre outros.

Entretanto, para viabilizar o seu uso é imprescindível, primeiramente, estudar e redefinir os atuais sistemas de alimentação mecânica que comumente são utilizados na indústria de cerâmica vermelha, os quais estão projetados para operar regularmente com materiais de elevada densidade a granel, como é o caso do cavaco de madeira.

A redefinição do projeto destes tipos de alimentadores mecânicos visa garantir um conjunto de alimentação que cumpra algumas regras básicas que permitam a operação em regime estável e adequado de combustão dos fornos, entre outros termos:

1. Deve ser um sistema construtivo e operacionalmente simples, porém automatizado, compacto e de baixo custo;
2. Deve ser operacionalmente funcional e flexível às demandas energéticas do forno e do combustível em uso;
3. Deve garantir uma alimentação uniforme e estável de maneira a manter o regime térmico na câmara de combustão, e conseqüentemente, as temperaturas recomendadas.

Os resultados mostraram que durante a operação do sistema de alimentação com Capim Elefante “solto”, logo alguns minutos após o início da alimentação, começaram a se manifestar insuficiências na capacidade de entrega da máquina, primeiro um descarregamento cíclico, depois um fluxo pobre de material e finalmente a falta de material sendo descarregado. Na figura 4.7 procura-se mostrar estes fenômenos de uma maneira continua.

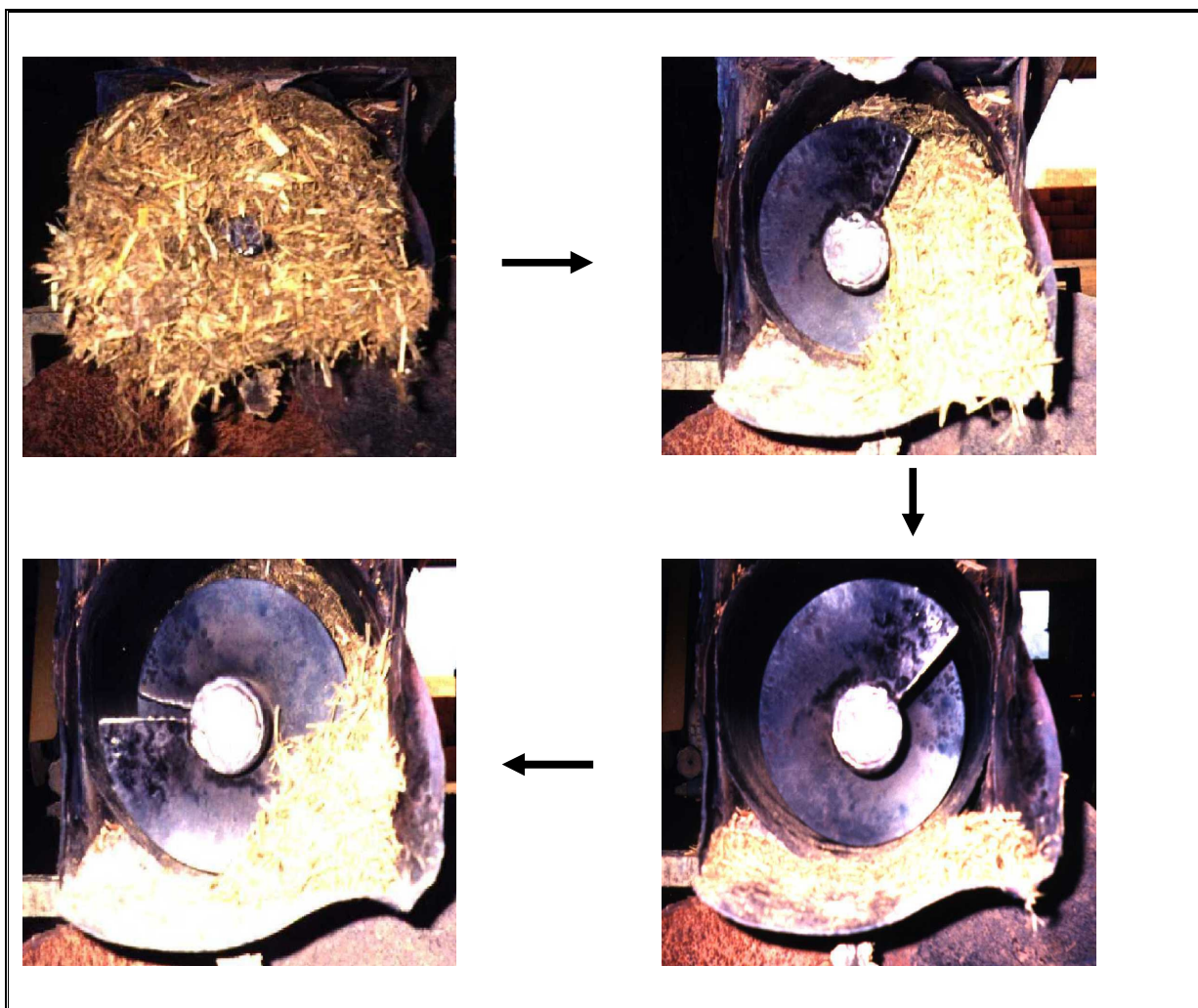


Figura 4.7 - Comportamento do capim elefante no silo de alimentação

Na grande maioria dos casos isto é devido a problemas relacionados, principalmente, com a dificuldade no escoamento do material dentro do silo, problemas que são bem conhecidos e reportados na literatura técnica (BATES, 1994). Em essência ocorre a formação espontânea de um arco bem na saída do silo, o qual é capaz de suportar a massa estagnada de material.

Fica claro então que o maior problema não foi obter baixas vazões de material para as velocidades de rotação da rosca-sem-fim ensaiadas, embora também não deixe de sê-lo. A maior dificuldade foi garantir o enchimento homogêneo da rosca situada bem abaixo do silo.

Mesmo com a contribuição humana para facilitar o escoamento do Capim Elefante através do silo, tal operação se apresenta penosa, se tornando inviável.

4.3 – Testes de queima em forno de olaria

4.3.1 - Características construtivas e de operação do forno

O forno é do tipo intermitente e tem 4 câmaras de queima de geometria retangular, com teto em forma de abóbada construída em alvenaria de tijolos comuns. Cada câmara de combustão tem aproximadamente 2.510 mm de altura, 1.500 mm de largura e 1.100 mm de profundidade. Apresenta uma grelha construída de tijolos refratários do tipo furado, com uma declividade de 45° em relação à parede frontal à câmara de combustão.

Cada “boca” da câmara de combustão apresenta a forma de um quadrado, de dimensões aproximadas de 520 mm x 520 mm, sendo este ponto usado para colocar o duto da rosca de alimentação do sistema mecânico de alimentação de combustível. A entrada de seção circular para o ar de combustão, está situada a 450 mm abaixo de cada “boca” de alimentação. No caso de usar alimentadores mecânicos, o ar de combustão é suprido por meio de um ventilador, o qual é acionado por um motor elétrico. A vazão de ar de combustão pode ser regulada através de uma válvula tipo “*damper*”, colocada na sucção do ventilador. O forno tem 11.200 mm de comprimento por 5.650 mm de largura e 2.510 mm de altura.

A carga de tijolos a ser “queimada” fica adequadamente distribuída numa área situada na parte posterior do forno, bem atrás das câmaras de combustão. Os gases da combustão saindo através de canais situados na parte superior da câmara “banham”, de cima para baixo, a carga de tijolos, sendo depois levados até a chaminé através de um canal subterrâneo situado na base do forno, sob o princípio de tiro natural da chaminé. Deve ficar bem claro que os gases saindo pelos canais superiores das câmaras de combustão, não “banham” somente uma carga definida de tijolos, mas sim se misturam com os gases provenientes das outras câmaras para desta forma “banhar” a carga total. Durante a queima a temperatura dentro da câmara pode ser variada a partir do aumento ou diminuição da abertura do registro situado no canal comunicante à chaminé. Na fase de resfriamento este registro é fechado e o registro localizado no canal indo

para a estufa (secador) é aberto e, sob o princípio de tiro forçado (um ventilador é colocado na porta lateral do forno) os gases quentes são levados para a estufa e são aproveitados para secar os tijolos úmidos que serão queimados a seguir. A figura 4.8 mostra um esquema de um forno típico da Cerâmica Nossa Senhora Auxiliadora. Enquanto que a figura 4.9 mostra o posicionamento dos termopares utilizados no monitoramento das temperaturas.

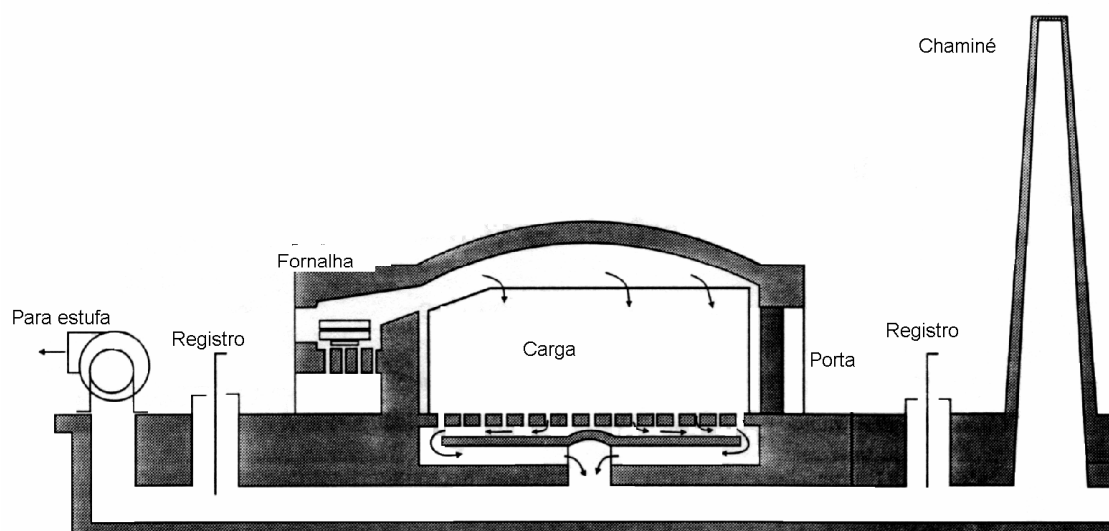


Figura 4.8 – Seção transversal do forno

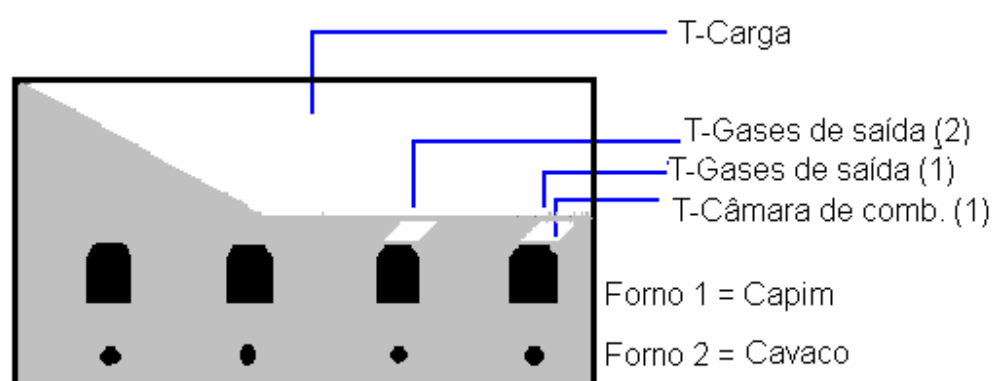


Figura 4.9 – Seção transversal do forno mostrando o posicionamento dos termopares

4.3.2 - Resultados dos testes de queima usando-se capim elefante

Os testes de queima têm por objetivo, avaliar a capacidade energética do capim elefante para fornecer e manter a temperatura requerida na saída da fornalha com alta eficiência da combustão. Para tanto, tomou-se como critério manter a temperatura na faixa de 1000°C, temperatura considera ideal no período da queima quando se trabalha com resíduo de madeira. Foram realizadas tomadas de temperaturas em pontos situados em diferentes níveis do forno. Diante da dificuldade de alimentação do capim elefante solto, foram experimentadas misturas em varias proporções. A tabela 4.7 mostra as proporções (em volume) testadas, o regime de funcionamento do alimentador, as vazões e as temperaturas medias atingidas. Na figura 4.10 tem-se os perfis de temperaturas.

Tabela 4.7 - Proporções de mistura, vazões e temperaturas medias

Testes	Resíduos de madeira	Capim elefante	Velocidade de alimentação	Vazão (kg/h)	Temperatura media (°C)
1	100%	0%	normal máxima	155 184	1075 > 1100
2	75%	25%	normal máxima	- -	1075 1075
3	50%	50%	normal máxima	162	800 1050
4	33%	66%	normal máxima	Instabilidade na alimentação	
				108	1050
5	25%	75%	normal máxima	Instabilidade na alimentação	
				90	950
6	0%	100%	normal máxima	Não alimenta Não alimenta	

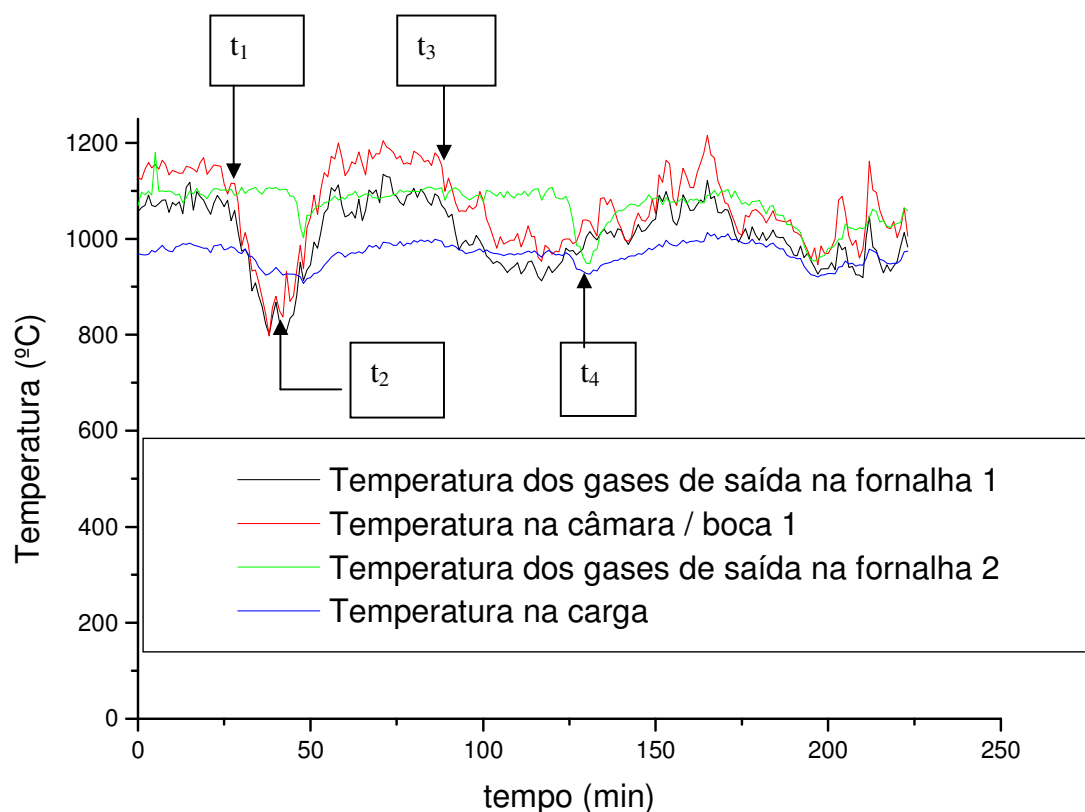


Figura 4.10 - Comportamento térmico das misturas testadas

A fornalha 1 reflete a capacidade da mistura 50 % de Capim Elefante com 50 % de resíduo de madeira, de manter a temperatura necessária na câmara 1.

A fornalha 2 sendo alimento com 100 % de resíduo de madeira foi considerada como padrão para este tipo de forno.

Os intervalos de tempos $t_1 - t_2$ e $t_3 - t_4$, representam os momentos em que o alimentador foi operado com velocidade normal e os demais espaços de tempo com velocidade máxima. A partir desse fato se pode observar a necessidade de operar o alimentador com velocidade máxima a fim de garantir uma vazão de material que possa assegurar a temperatura requerida na saída da fornalha.

Pode-se dizer que, quando o Capim Elefante é normalmente alimentado, isto é de forma contínua e regular, ele pode fornecer a temperatura necessária na saída da fornalha para assegurar o processo térmico na indústria de cerâmica vermelha.

Capítulo 5

Aplicação da metodologia de Análise de Ciclo de Vida em processo produtivo de cerâmica estrutural tendo como insumo energético o capim elefante

5.1 - Definição dos objetivos e do escopo

A definição dos objetivos e do escopo é a fase inicial na qual é feita a escolha que determinará o plano de funcionamento completo da análise de ciclo de vida. O objetivo da análise de ciclo de vida, neste presente trabalho, é de proporcionar uma análise comparativa das diferentes fases do ciclo de vida do processo produtivo de cerâmica estrutural tendo como insumo energético o capim elefante. Com essa abordagem visa-se proporcionar argumentos que possam responder a algumas das questões mais levantadas em relação ao sistema produtivo de cerâmica estrutural. Ou seja, durante o processo, quais substâncias são emitidas e a que taxas? Quais partes do sistema são responsáveis por estas emissões? Qual é a contribuição do insumo energético? Para a indústria de cerâmica estrutural, as respostas a estas perguntas poderão vir a ser uma ferramenta para a criação ou a promoção de um novo processo produtivo ou para a escolha de um novo tipo de combustível. Para o consumidor poderá ser um meio para analisar uma escolha que a indústria ou o decisório busca apresentar como benéfico para o ambiente.

5.1.1 - Unidade funcional

A unidade funcional, também conhecida como a quantidade de produto ou de serviço que representa a base da análise do ciclo de vida, é escolhida como sendo um milheiro de tijolos. Tal escolha deve-se ao fato de que, as emissões, as matérias-primas, os insumos energéticos e a

energia elétrica consumidos são funções da escala da indústria e da tecnologia de queima utilizada. Portanto, tomou-se o cuidado de não escolher uma unidade funcional que seja função destes parâmetros e dificultar uma futura comparação com outros sistemas ou tipo de insumo energético.

5.1.2 - Delimitação das fronteiras do sistema estudado

O processo estudado é baseado no conceito de geração de calor através da combustão direta da biomassa para a queima de material cerâmico. Literalmente, o sistema considerado para análise de ciclo de vida inclui a produção da biomassa (capim elefante), a extração da matéria-prima (argila), o transporte do insumo energético e da matéria-prima até a indústria, a produção e a queima dos produtos cerâmicos (figura 5.1). Não consideramos o transporte dos produtos cerâmicos até o consumidor e seu uso final ou reuso porque estas etapas praticamente são iguais para qualquer processo e dificilmente irão afetar a comparação.

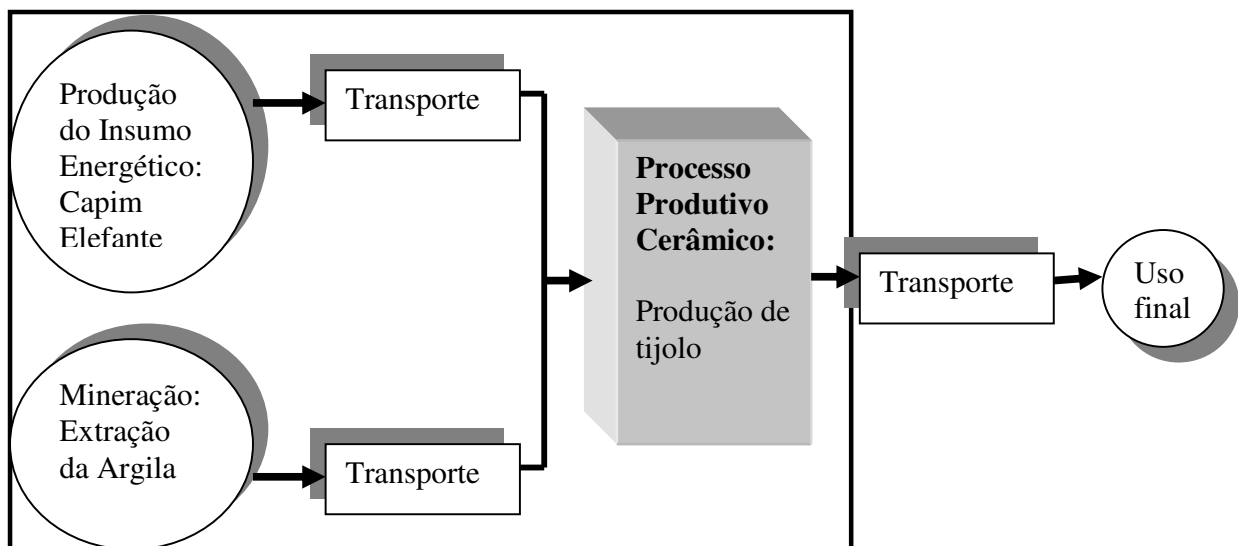
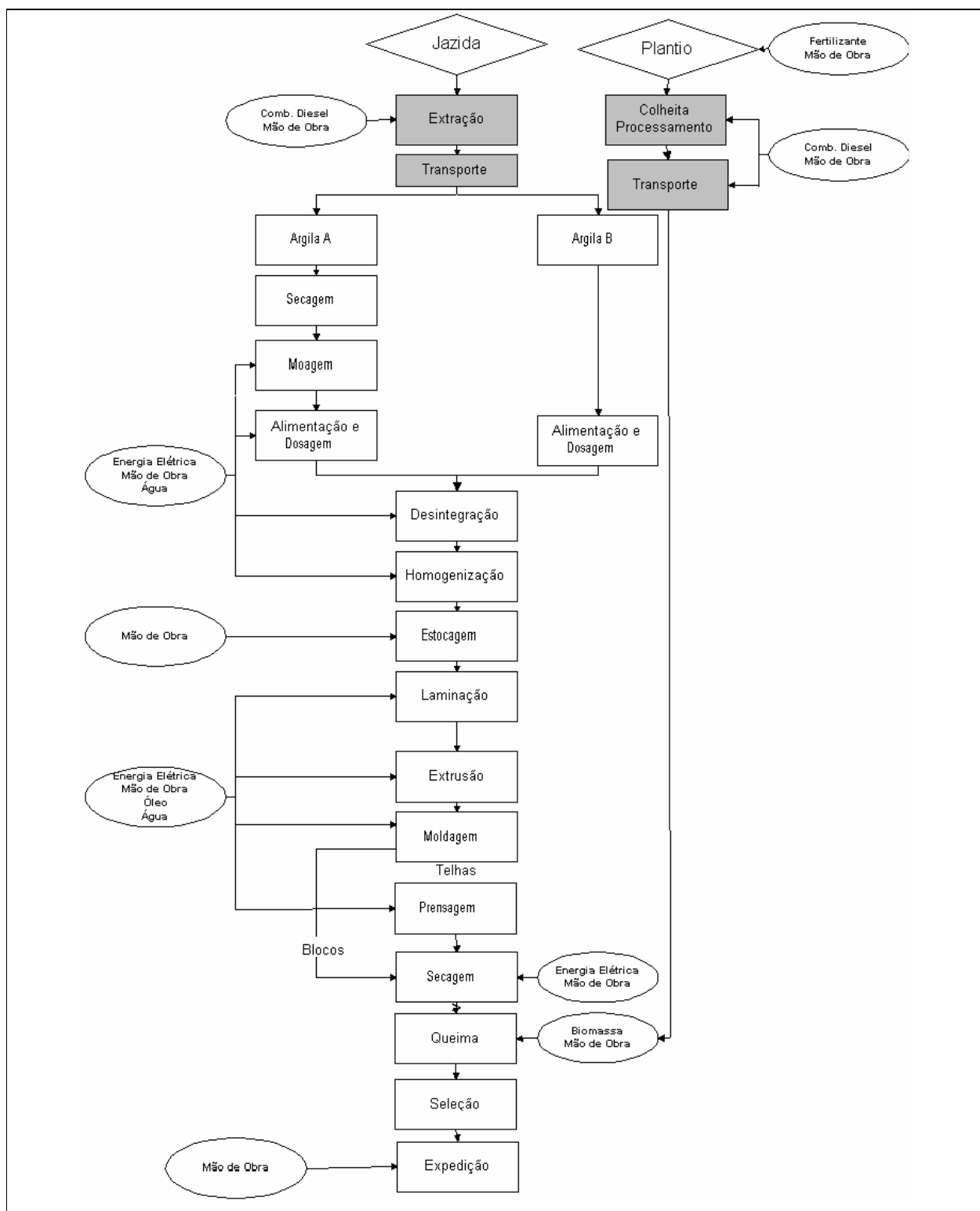


Figura 5.1 - Estrutura geral do sistema estudado



Fluxograma do processo produtivo de cerâmica estrutural

5.2 - Análise do Inventário

5.2.1 - Produção e processamento do capim elefante

O capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum) é uma gramínea, uma espécie adaptada a altas temperaturas e umidade, entretanto tolera temperaturas baixas antes de interromper o crescimento (Jacques, 1990). O capim elefante em estudo foi produzido dentro do Programa Integrado de Biomassa – PIB, financiado pela FINEP. Iniciado em 1998, este programa tem o objetivo de estudar o aproveitamento do capim-elefante para diversos usos. Para tanto, foi dividido em sete subprojetos:

- Otimização do plantio de gramíneas de alto porte
- Plantio com interação bacteriana
- Extração de proteínas do caldo das gramíneas
- Queima direta de gramíneas (colheita, secagem, transporte e combustão)
- Processo de carvoejamento de gramíneas
- Processo de gaseificação de gramíneas
- Estudos de pré-viabilidade econômica

A coordenação ficou a cargo do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, que convidou outros institutos de pesquisa para desenvolverem projetos paralelos com esta gramínea. O próprio IPT atua também nos estudos de pré-viabilidade e o Instituto de Zootecnia de Nova Odessa foi convidado para otimizar o plantio e fornecer matéria-prima para os outros grupos. A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA – RJ, ficou responsável pelo estudo do plantio com interação bacteriana para fixação do nitrogênio do ar, visando reduzir o uso de fertilizantes nitrogenados.

Além destes, foram convidadas da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP equipes da Faculdade de Engenharia Mecânica - FEM e da Faculdade de Engenharia Agrícola - FEAGRI. À primeira coube a responsabilidade sobre a gaseificação da gramínea, enquanto a segunda estuda a queima direta e carvoejamento da gramínea e o desenvolvimento de uma máquina colhedora específica para capim.

Para a produção do capim elefante, dois experimentos foram desenvolvidos no Instituto de Zootecnia, sendo um na Estação Experimental Central em Nova Odessa, localizada nas coordenadas 22° 41' S e 47° 18' W, a 550 m de altitude e outro na Estação Experimental de Brotas, localizada nas coordenadas 22° 16' S e 48° 7' W, a 650 m de altitude. Os climas de ambas as Estações podem ser classificadas com Cwa, pela classificação climática de Koeppen. Os solos de Nova Odessa e Brotas onde foram instalados os experimentos apresentam as características físico-químicas mostradas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Características físico-químicas do solo das duas regiões.

	pH(CaCl ₂)	P(ug/ml)	K	Ca	Mg	H+Al	S	T	Análise química
Regiões de experimentação	em meq/100 ml de TFSA								V%
Nova Odessa	4,0	5	0,11	0,5	0,4	5,2	1,0	6,2	16
Brotas	3,9	9	0,11	0,2	0,1	5,8	0,4	6,2	7

Foram avaliadas quatro doses de nitrogênio (50, 100, 200 e 400 kg/ha/ano) e três frequências de cortes (F_1 = dois cortes/ano, 150 e 200 dias de crescimento; F_2 = 3 cortes/ano, 90, 90 e 180 dias de crescimento e F_3 = 4 cortes/ano, 90, 60, 60 e 150 dias de crescimento), num delineamento de blocos ao acaso com 4 repetições, em que os tratamentos foram arranjados em esquema fatorial (4 x 3).

Os experimentos foram plantados em 21/01 e 28/04 de 1993 em Nova Odessa e Brotas, respectivamente. As parcelas experimentais mediam 28,80 m², com uma área útil de 9,60 m². O plantio foi efetuado em linhas espaçadas de 0,60 m e as mudas foram colocadas no sulco, duas a duas, no sentido pé com ponta e, em seguida, cortadas em pedaços de duas a três gemas.

Em Nova Odessa, no momento do plantio foram efetuadas adubações com fósforo, aplicando-se 25, 50, 100 e 200 kg de P₂O₅ / ha, para os tratamentos de 50, 100, 200 e 400 kg de N. Em Brotas, foi aplicado em todos os tratamentos 50 kg de P₂O₅ / ha.

Após 40 dias do plantio foram aplicados, nos dois experimentos 50 Kg de nitrogênio (uréia) e 25 kg de K₂ O (cloreto de potássio). O corte de rebaixamento para início dos levantamentos de produção foi realizado em 29 e 30/09/1993 em Nova Odessa e Brotas, respectivamente. Após cada corte, nas frequências estabelecidas, foram efetuadas as adubações nitrogenadas, aplicando-se a dose dividida pelo número de cortes programados. A adubação potássica foi efetuada, para todos os tratamentos, tomando-se por base uma reposição de 10 kg de KCl para cada tonelada de matéria verde removida por hectare.

O capim elefante foi cortado após 1 ano de vegetação. A máquina utilizada para corte do capim foi uma colhedeira de forragem de marca CREMASCO, regulada para picar a forragem em pedaços de mais ou menos 11 mm. Essa máquina corta o capim e ao mesmo tempo pica a forragem em pedaços pequenos, lançando o material já picado sobre a carreta que vai acoplada nela. O trator utilizado foi o MF-275 (Massey Ferguson). Dependendo do comprimento da capineira e do estado do capim, essa máquina chega a colher 40 a 45 toneladas/10 horas de trabalho.

A secagem do capim foi feita de duas formas:

- 1) Secagem dentro de um galpão (durante o período das chuvas, fevereiro), a forragem foi colocada em camada de mais ou menos 40 cm e foi revolvida duas vezes ao dia (às 10:00 e às 15:00 horas) até o capim secar. A secagem durou cerca de vinte e três dias. (temperaturas elevadas, mesmo a sombra);
- 2) Secagem em terreiro com pavimento de asfalto (durante o período seco, julho); a forragem foi colocada sobre o terreiro em camada de mais ou menos 400 mm e foi revolvida duas vezes ao dia (às 10:00 e às 15:00 horas) até o capim secar. A secagem durou cerca de quinze dias. (temperaturas amenas, mesmo ao sol).

A forragem nos dois processos de secagem foi revirada com uma enxada rotativa acoplada ao trator AGRALE 4100, operado de marcha ré.

A prensa utilizada para fazer os fardos foi do tipo utilizado para prensar sucata: capacidade de prensagem do cilindro, mais ou menos vinte toneladas, área de prensagem de 2000 cm² (50 x 40 cm), pressão por cada cm² de mais ou menos 10 kg. Fardo de 400 x 500 x 800 mm e peso na faixa de 30 a 40 kg. Para enfardar o material foram utilizadas estacas (de 450 mm) do próprio capim nas extremidades para formar a base e poder amarrar o fardo. Para amarrar o fardo foi utilizada cordinha de sisal, tratada com alcatrão, as mesmas utilizadas em enfardadeira de feno. Esses fardos foram desenvolvidos simplesmente para facilitar o transporte. Na Figura 5.2 mostra-se fotos dos fardos de capim elefante utilizados.



Figura 5.2 - Fardos de Capim Elefante

5.2.2 - Balanço energético para um hectare de capim elefante

Um balanço de energia é uma comparação entre a energia armazenada no combustível e a energia requerida para plantio e crescimento da planta, processamento e distribuição do combustível. Para efeito de balanço de energia, estima-se que, por ano, um hectare de capim elefante produz, no mínimo, cerca de 40 toneladas de matéria seca equivalente a 536 GJ (PCS = 14,6 MJ/kg, PCI = 13,4 MJ/kg) enquanto que o consumo de energia necessária ao processamento de uma mesma quantidade (corte uma vez por ano, empilhamento, enfardamento, transporte por 30 km, picagem) fica por volta de 22 GJ. Juntamente com a energia gasta com o plantio, a produção de insumo energético alternativo através do capim elefante apresenta um balanço energético altamente positivo. A seguir, detalhemos o uso e a produção de energia nas diferentes etapas da produção do capim elefante e sua preparação:

□ Dados iniciais
✓ Produtividade estimada do capim elefante = 40 t/ha.ano, base seca ✓ Poder calorífico superior do capim elefante = $14,6 \times 10^{-3}$ GJ/kg ✓ Poder calorífico inferior do capim elefante = $13,4 \times 10^{-3}$ GJ/kg ✓ Regime de produção do capim elefante = um corte por ano ✓ Poder calorífico do óleo utilizado como combustível nos equipamentos para corte, empilhamento, enfardamento e transporte do capim elefante = $41,839 \times 10^{-3}$ GJ/l Consumo de energia elétrica na picagem do capim elefante = 2 kWh/t

□ Energia contida no capim elefante	
Comentários	Cálculo
A diferença entre o poder calorífico superior e o poder calorífico inferior é a energia requerida para evaporar a umidade presente no combustível. Em instalações industriais, a temperatura de condensação, portanto o calor latente, não é utilizado. Devido a isso, o poder calorífico inferior é de maior importância (CORTEZ et al., 1997). Sendo assim, a energia contida no capim é estimada em:	$ \begin{array}{r} 40.000 \text{ kg/ha .ano} \\ \times \\ 13,4 \times 10^{-3} \text{ GJ/kg} \\ \hline \mathbf{536 \text{ GJ/ha.ano}} \end{array} $

❑ Energia consumida na corte do capim elefante	
Comentários	Cálculo
O capim elefante será cortado após 1 ano de vegetação e será utilizada uma máquina colhedeira de forragem com capacidade de corte de 4.000 kg por hora e consumindo 10 litros de óleo por hora.	$ \begin{array}{r} (40.000 \text{ kg/ha. ano} : 4.000 \text{ kg/h}) \\ \times \\ (10 \text{ litros óleo/h} \times 41,839 \times 10^{-3} \text{ GJ/litro de óleo}) \\ \hline \mathbf{4,184 \text{ GJ/ha.ano}} \end{array} $

❑ Energia consumida no empilhamento do capim elefante	
Comentários	Cálculo
Consideramos uma empilhadeira com capacidade de produção de 5000 Kg/h e consumo de 10 litros de óleo por hora trabalhada.	$ \begin{array}{r} (40.000 \text{ kg/ha.ano} : 5.000 \text{ kg/h}) \\ \times \\ (10 \text{ litros óleo/h} \times 41,839 \times 10^{-3} \text{ GJ/ litro óleo}) \\ \hline \mathbf{3,347 \text{ GJ/ha.ano}} \end{array} $

❑ Energia consumida no enfardamento do capim elefante	
Comentários	Cálculo
A prensa utilizada para fazer o enfardamento do capim elefante tem capacidade de prensagem de 4000 kg/h e um consumo estimativo de 10 litros de óleo por hora de funcionamento.	$ \begin{array}{r} (40.000 \text{ kg/ha.ano} : 4000 \text{ kg/h}) \\ \times \\ (10 \text{ litros óleo/h} \times 41,839 \times 10^{-3} \text{ GJ/litro}) \\ \hline \mathbf{4,183 \text{ GJ/ha.ano}} \end{array} $

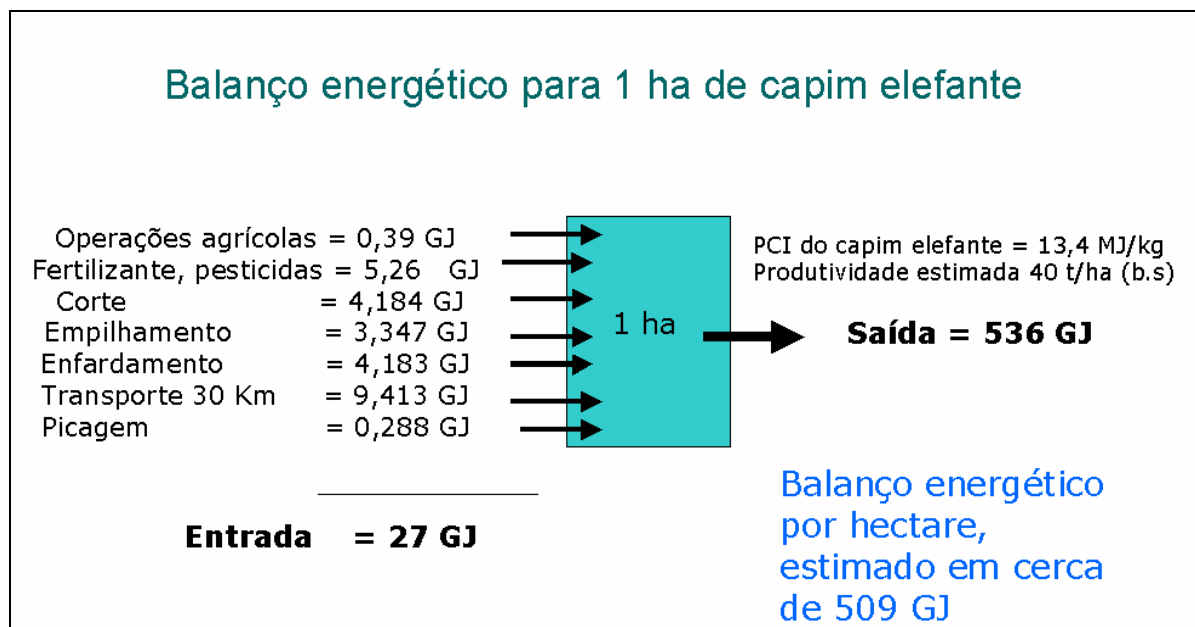
□ Energia consumida no transporte por 30 km	
Comentários	Cálculo
Para enfardar o material, foram utilizadas estacas (de 450 mm) do próprio capim nas extremidades, formando a base. Para amarrar o fardo, foi utilizada cordinha de sisal, tratada com alcatrão, as mesmas utilizadas em enfardadeira de feno. Estes fardos foram desenvolvidos simplesmente para facilitar o transporte. Portanto, há de considerar-se este peso extra a ser transportado, estimado a 10.000 kg. O transporte pode ser realizado em caminhões com capacidade de 20.000 kg e consumo, por km, rodado de 3 litros de óleo.	$\begin{aligned} &\{(40.000 + 10.000) \text{ kg/ha.ano} : 20.000 \\ &\quad \text{kg}\} \\ &\quad \times \\ &(30 \text{ km} \times 3 \text{ litros de óleo/km} \times 41,839 \times \\ &\quad 10^{-3} \text{ GJ/litro}) \\ &\hline &\mathbf{9,413 \text{ GJ/ha.ano}} \end{aligned}$

□ Energia consumida na picagem do capim elefante	
Comentários	Cálculo
Moinho elétrico com consumo de 2 kwh por tonelada de capim elefante seco processado	$\begin{aligned} &40.000 \text{ kg/ha.ano} \times 02 \text{ kWh} / 1000 \text{ kg} \\ &\quad \times \\ &3,610 \times 10^{-3} \text{ GJ/kWh} \\ &\hline &\mathbf{0,288 \text{ GJ/ha.ano}} \end{aligned}$

JOHANSSON et al. (1993), estimaram o consumo de energia necessário para o estabelecimento de um hectare de plantio de capim, bem como, o equivalente em energia do fertilizante utilizado, chegando a valores de 0,39 GJ/ha.ano e 5,26 GJ/ha.ano, respectivamente. Sendo assim, o consumo de energia (óleo, eletricidade e fertilizantes) fica então:

$$\{(4,184 + 3,347 + 4,183 + 9,413 + 0,288) + (0,39 + 5,27)\} \text{ GJ/ha.ano} = 27 \text{ GJ/ha.ano}$$

Em resumo a razão do balanço de energia do capim elefante é de 19 por 1. Em outras palavras para cada unidade de energia fornecida através do uso de fertilizante, pesticida, combustível, matéria-prima, colheita, processamento e transporte é disponibilizada 19 unidades de energia contido no capim elefante.



A energia de entrada (*Input energy*) bem como os níveis de energia do processo produtivo do capim elefante são comparados com os da cana-de-açúcar. Entretanto fica claro que a cana-de-açúcar tem valor econômico, pois produz açúcar e não tanto pela fibra (bagaço e palha), já que o capim elefante é uma cultura essencialmente energética.

Tabela 5.2 - Energia de entrada – “*Input energy*”

	Capim elefante	Cana de açúcar*
Operações agrícolas	9,75 MJ/ton	30,10 MJ/ton
Transporte	7,84 MJ/ton	34,92 MJ/ton**
Fertilizante + herbicidas + calcário	131,5 MJ/ton	87,02 MJ/ton
Total	149,09 MJ/ton	152,04 MJ/ton

* Referencia: Leal, R. M. e Macedo, I. C.(2003)

Tabela 5.3 - Níveis de energia

Consumo direta de energia: combustíveis e energia elétrica	4,57 GJ/ha 114,32 MJ/ton
Energia usada na produção: fertilizante, lubrificantes, pesticidas.	5,26 GJ/ha 131,5 MJ/ton
Energia utilizada na preparação do capim: transporte, enfardamento, picagem	7,81 GJ/ha 195,45 MJ/ton

5.2.3 - Extração de argila

O termo argila designa uma rocha sedimentar, de textura terrosa, baixa granulometria ($<2\ \mu\text{m}$) que, geralmente, apresenta plasticidade quando umedecida com água. Os argilo-minerais são compostos por silicatos hidratados de alumínio e ferro, contendo ainda, não raramente, elementos alcalinos e alcalinos terrosos e outros minerais residuais, inclusive “matéria orgânica”. As argilas classificadas para cerâmica vermelha devem apresentar características de plasticidade que permite fácil moldagem, teor médio a elevado para a tensão ou módulo de ruptura e, geralmente, apresentam coloração avermelhada após a queima em baixas temperaturas, $\pm 950\ ^\circ\text{C}$ (Santos, 1975).

A extração de argila é feita a céu aberto utilizando retroescavadeiras ou equipamentos similares. Normalmente, a área de extração se encontra próxima à indústria já que a dificuldade da entrada de caminhões de grande porte na jazida inviabiliza o transporte. Em média são necessários $2\ \text{m}^3$ de argila para a produção de um milheiro de tijolos de 8 furos.



Figura 5.3 - Extração de argila

A extração da argila apresenta algumas características que lhe são específicas, qualquer que seja o tipo de mineral extraído, características estas não encontradas em outros tipos de empreendimentos:

- Rigidez local: o desenvolvimento de uma mina só pode ocorrer caso exista um depósito mineral economicamente lavrável: explorável;
- Singularidade: cada jazida é um caso impar, exigindo estudo e projeto individualizados;
- Dinâmica: durante a vida útil de uma jazida, o projeto original caso exista, provavelmente sofrerá múltiplas alterações que repercutirão positivamente e/ou negativamente sobre o meio ambiente.

Há uma cultura vigente entre os empresários do setor oleiro de praticarem a exploração de jazidas de argila apenas em profundidades rasas, não superiores a três ou quatro metros. Como consequência, extensas áreas são degradadas, parecendo que não há, atualmente - pelo menos pela sua grande maioria, nenhuma política de recuperação destas áreas, tanto na esfera dos poderes públicos, quanto na classe empresarial.

É de grande relevância a recuperação de tais áreas, pois a exploração cria uma série de inconvenientes, entre outros: i) possibilidade de contaminação de águas e solos superficiais e subterrâneos, pois água da chuva e dos rios invadem as jazidas, como também, poluentes podem ser lixiviados ou carreados pelas águas, contaminando-os; ii) assoreamento das margens das jazidas, pela erosão contínua e acelerada, provocada pelo desmatamento; iii) poluição visual do ambiente; iv) geração de pó fino, pelo fato de se criar áreas desprovidas de vegetação, próximas ao centro urbano, fazendo com que partículas finas sejam suspensas e transportadas pela ação do vento, podendo causar problemas alérgicos e respiratórios na população local.

Alternativas para o reaproveitamento das áreas exploradas podem dar-se através de: i) atividade de reflorestamento, procurando-se plantar espécies com potencial de uso como lenha (capincultura), para fins de aplicação na queima dos materiais cerâmicos; ii) atividade comercial de piscicultura, formando-se pequenos lagos, rasos, para a facilitação de captura das espécies piscosas; iii) local para disposição de resíduos sólidos urbanos, para acabar com o armazenamento destes materiais em áreas próximas a cursos d'água, moradias, plantações, etc.

A atividade de reaproveitamento como disposição de resíduos sólidos pode esbarrar num problema ambiental: em época pluvial, as águas superficiais avançam jazida adentro, ao passo que as águas subterrâneas ascendem, tornando o contato destas águas com os resíduos um sério comprometimento de contaminação, podendo se estender por quilômetros, no entorno das áreas de disposição.

5.2.4 - Transporte

Na indústria de cerâmica estrutural, o transporte tanto da argila e da lenha até olaria onde elas serão utilizadas no processo produtivo como dos tijolos produtos desse processo é realizada, principalmente, com caminhões e via estrada. O tipo de combustível comumente consumido por estes meios de transportes é o diesel. O inventário do subsistema transporte considera o consumo de combustível e as emissões geradas pelo transporte da argila e da lenha no raio de 30 km.



Figura 5.4 - Transporte de argila



Figura 5.5 - Transporte de tijolos

5.2.5 - Processo produtivo de cerâmica estrutural

A biomassa chega à indústria pronta para ser utilizada enquanto que a argila precisa passar em algumas etapas de processamento. A obtenção de produtos de cerâmica estrutural ocorre por meio de quatro fases sequenciais bem definidas: preparação da matéria-prima (beneficiamento), conformação, secagem e tratamento térmico. VILLAR (1988), completa afirmando que o processo utilizado segue, basicamente, a mesma estrutura em todas as indústrias.

Porém, algumas empresas utilizam equipamentos rudimentares e outros equipamentos mais modernos.

Conforme MOTTA *et. al.* (2001), a preparação da massa é feita, geralmente, através da mistura de uma argila “gorda”, que é caracterizada pela alta plasticidade, granulometria fina e composição essencialmente de argilo - minerais; com uma argila “magra”, essa rica em quartzo e menos plástica, podendo ser caracterizada também como material redutor de plasticidade. Observa-se que, na prática ceramista, a utilização da classificação granulométrica da massa é empírica, baseada na experiência do ceramista prático, o que dificulta a padronização e a formalização dos conhecimentos da área. Outra observação é que os limites entre as classes de argila não são rígidos, pois vários ceramistas usam a mesma massa para a confecção de telhas e blocos cerâmicos (tijolos furados). Adicionalmente à composição granulométrica, que reflete o conteúdo de argilo-minerais e quartzo, as argilas contêm proporções variadas de matéria orgânica, material que contribui para maior plasticidade e resistência mecânica a cru das peças.

Para Oliveira (2000), o processo de secagem pode ser definido como a eliminação da água de conformação dos produtos cerâmicos através do ar aquecido e é considerada uma das fases mais delicadas do processo produtivo. A umidade de extrusão dos produtos cerâmicos, normalmente, oscila entre 20 e 30% e, após a secagem, esta umidade residual deve estar abaixo de 5%. Alguns cuidados são fundamentais para o controle dessa fase.

O ciclo de secagem deve ser definido em função da carga disposta no secador, da temperatura utilizada e, principalmente, em função dos tipos de argilas. Argilas muito plásticas, normalmente, requerem muita água no processo de extrusão e, conseqüentemente, experimentam grandes retrações na secagem. Deve-se então utilizar, no máximo, 50% destas argilas e completar a formulação com argilas menos plásticas.

A secagem pode ser do tipo natural ou forçada. A primeira acontece com exposição das peças cerâmicas ao ar livre. Esse processo é utilizado quando a empresa possui uma produção baixa ou quando se dispõe de sol o ano todo e mão-de-obra barata. A secagem natural pode durar de dois a oito dias, dependendo da temperatura ambiente e da ventilação. A exposição, em pátio,

deve ser de forma que garanta a circulação de ar entre as mesmas, evitando retração diferenciada e, conseqüentemente, as trincas – comuns no processo lento.

A secagem forçada pode ser através de secadores intermitentes ou contínuos. A temperatura, no início da secagem, deve ser de aproximadamente 40°C, aumentando gradativamente até chegar a 100°C. Temperaturas elevadas, no início da secagem, serão fontes de trincas. Já as baixas, aumentam cada vez mais o ciclo de secagem. Para se evitar as trincas é recomendável levantar a curva de Bigot das argilas para conhecer-se o momento em que é permitido acelerar a secagem. Sabe-se que toda argila perde 50% da água antes de atingir sua retração máxima permitindo-se acelerar a secagem após obterem-se estes valores.

O material seco é levado ao forno e os mesmos podem utilizar como fonte de energia a lenha, a serragem, os resíduos de madeira, o óleo ou o carvão mineral. O processo de queima dura aproximadamente 150 horas, em virtude do elevado nível de umidade proveniente da secagem natural.

Durante a queima o material passará por transformações físicas e químicas. Os seguintes processos ocorrem em uma seqüência de temperatura crescente:

5.3 - Avaliação dos impactos

5.3.1 - Classificação dos impactos: As seguintes classes de impactos serão consideradas neste trabalho:

- **Chuva ácida:** embora possa ter diversas origens naturais (erupções vulcânicas, putrefação de vegetais etc.), a chuva ácida deve-se, principalmente, a causas antropogênicas, ou seja, processos que resultam da exploração e uso da energia, especificamente da "queima" de combustíveis fósseis.

Alguns dos gases que se desprendem da combustão dos combustíveis, em particular, o dióxido de enxofre (SO₂) e os óxidos de nitrogênio (NO_x), podem depositar-se em seco e serem

absorvidos diretamente pela terra, lagos ou vegetação (deposição seca), ou ainda permanecer na atmosfera e oxidar-se graças à ação de agentes oxidantes (catalisadores) como o ozônio (O_3), o peróxido de hidrogênio ($OH^\cdot$) ou o amônio (NH_4^+). Dessa maneira, o dióxido de enxofre converte-se em ácido sulfúrico (H_2SO_4) e os óxidos de nitrogênio em ácido nítrico (HNO_3).

De modo geral, os ácidos formados se dissolvem nas partículas de nuvens e névoas, podendo percorrer grandes distâncias antes de precipitar em forma de chuva, neve, neblina ou granizo (deposição úmida).

Os ácidos dissolvidos em água aparecem, principalmente, em forma de íons (SO_4^- , NO_3^- e H^+). O ácido nítrico libera um íon hidrogênio, enquanto que da reação do ácido sulfúrico resultam dois íons; assim, a acidez das precipitações será diretamente proporcional à concentração de íons hidrogênio presentes.

O amoníaco (NH_3), gerado a partir de processos naturais e da atividade humana, é o protagonista do seguinte paradoxo: por um lado, neutraliza alguns íons hidrogênio e, por outro lado, da reação resulta o íon amônio (NH_4^+), que catalisa a formação de ácidos.

Ao precipitar, a chuva ácida libera metais pesados (Pb, Al, Hg, V, Cd...) e íons (H^+ , NH_4^+ , NO_3^- , $SO_4^{=}$), acidificando¹ os lagos e favorecendo a proliferação de algas verdes que acabam com a vida lacustre. Do mesmo modo, as florestas são seriamente danificadas pelos efeitos sobre as folhas das plantas, pelas perdas de nutrientes essenciais e pelo aumento de metais tóxicos que danificam as raízes e os microrganismos do solo.

Os efeitos da chuva ácida também podem ser observados sobre as estruturas metálicas dos edifícios em forma de corrosão e, inclusive, sobre a saúde das pessoas.

¹ O pH da chuva ácida oscila entre 4,5 e 5,6, no entanto, em algumas ocasiões pode alcançar valor de 3.

A deposição seca é uma variante do fenômeno da chuva ácida, consistindo na precipitação dos óxidos como gases ou pequenas partículas diretamente sobre o solo, lagos ou florestas. Sua ação costuma ser de curto alcance, afetando principalmente as zonas próximas do ponto emissor, embora caso as condições meteorológicas sejam favoráveis possam chegar a produzir este tipo de deposições a grandes distâncias.

Diferentemente do aquecimento global provocado pelas emissões de CO₂, a chuva ácida tem alguns efeitos muito mais localizados, ainda que possam chegar a ser continentais.

▪ **Toxicidade e ecotoxicidade:** as atividades humanas que provocam emissões de substâncias químicas no ambiente constituem um perigo na saúde humana (toxicidade) e para os ecossistemas (ecotoxicidade). Diferentes aproximações foram propostas dentro do quadro da análise de ciclo de vida para apreciar globalmente ou separadamente estes dois tipos de impactos. E numa preocupação de simplificar, alguns autores diferenciam os tipos de impactos de ecotoxicidade em:

- **Acidificação:** deposição de ácidos no solo ou na água. Os efeitos se traduzem pela diminuição do pH, do teor de nutriente e pelo aumento do teor de elementos potencialmente tóxicos. Essas modificações de ordem química terão, por consequência, certo número de efeitos biológicos como, por exemplo, uma diminuição da biomassa.

- **Eutroficação dos ecossistemas terrestre:** o azoto é um fator limitante para a produção de biomassa. Um aporte de azoto pode conduzir num primeiro tempo a um aumento de produção de biomassa (efeito muitas vezes desejado). Um aporte muito importante traduz-se por um desequilíbrio nutricional. Esse desequilíbrio, por sua vez, provoca um crescimento importante de algumas espécies em detrimento de outras.

▪ **Efeito estufa:** o equilíbrio radiativo natural na superfície da terra é determinado por uma grande parte pela presença de gases que têm a propriedade de interceptar as radiações emitidas pela terra, depois reenviá-los na direção do universo. Esse equilíbrio dos fluxos radiativos é atualmente susceptível de ser perturbado na medida em que o desenvolvimento da atividade

humana provoca uma modificação da composição da atmosfera, seja aumentando a composição de alguns gases preexistentes na atmosfera, seja ejetando novos componentes. Essa modificação dos fluxos radiativos é identificada como um aumento do efeito estufa natural.

Um dos principais problemas ambientais associados à exploração, ao uso e à transformação da energia é o "aquecimento global do planeta", decorrente do aumento gradual da temperatura média global do ar na superfície da Terra.

Atualmente, a maioria dos cientistas coincide em apontar a atividade humana como sendo a provocadora do aquecimento global terrestre, por contribuir com suas emissões para o aumento da concentração na atmosfera dos denominados "gases estufa".

No entanto, outros estudiosos apontam que as mudanças que o planeta está sofrendo (furacões, épocas de seca seguidas de chuvas torrenciais, expansão térmica dos oceanos, etc.) são decorrentes de variações naturais periódicas do clima, cujas origens não são claramente antropogênicas. Esses cientistas baseiam seus raciocínios no fato da Terra, ao longo de sua história, vir sofrendo flutuações climáticas, como a acontecida entre 1550 e 1850, que ficou conhecida como Pequena Glaciação, durante a qual se produziram grandes mudanças tanto de tipo econômico quanto social devido a um declínio de 2°C na temperatura média global do planeta.

Para entendermos a problemática do aquecimento global torna-se indispensável conhecer que a radiação move-se em uma zona do espectro eletromagnético compreendida entre o ultravioleta (comprimento de onda menor do que 0,4 μm) e o infravermelho distante (superior a 24 μm), passando pelo visível (entre 0,4 μm e 0,8 μm), pelo infravermelho próximo (entre 0,8 μm e 3 μm) e pelo infravermelho médio (entre 3 μm e 24 μm).

Contudo, a maior parte da radiação emitida pelo Sol concentra-se na zona do visível, enquanto a Terra emite em comprimentos de onda próximas às 10 μm : portanto, a radiação solar é emitida em sua maior parte em comprimento de onda curto, enquanto que a Terra o faz em onda longa ou infravermelha.

Analogamente ao espectro de radiação, há um outro de absorção provocado pela desigual capacidade dos corpos para absorver a radiação que lhe chega. Desta maneira, de um total de 100 partes de radiação solar de onde curto incidente, 19 são absorvidas diretamente na atmosfera pelo ozônio e pelo vapor de água, 51 chegam à superfície terrestre e as 30 partes restantes são refletidas para o exterior pela ação das nuvens (20 partes), do ar (6 partes), da superfície da neve e do gelo, e pela própria ação dos oceanos e continentes (4 partes no total) sem experimentar uma mudança no comprimento de onda.

Quanto à radiação de onda longa emitida pela superfície, das 51 partes que chegam à superfície terrestre, 6 partes escapam diretamente para o espaço sob forma de radiação infravermelha, 15 partes são absorvidas diretamente na atmosfera (efeito estufa), 7 são transmitidas por aquecimento direto entre a superfície e a atmosfera (calor sensível) e, finalmente, as 23 partes restantes são liberados como consequência da mudança de estado que o vapor procedente da evaporação das águas sofre ao passar a líquida na atmosfera.

Conseqüentemente, a emissão líquida da Terra é de 21 partes, dos quais 15, ou seja, aproximadamente 70%, contribuem para o efeito estufa natural necessário para temperar a vida no planeta. Tal e como se pode deduzir, há um equilíbrio entre o fluxo de radiação emitida pelo Sol e pela radiação refletida pela Terra, o qual condiciona em grande medida o clima do planeta.

Se por alguma razão aumentar a concentração de gases do efeito estufa na atmosfera, ocorrerá um desequilíbrio no balanço, provocando uma maior absorção da radiação emitida pela Terra e, portanto, um aumento da temperatura do ar na superfície do planeta.

Contudo, a proporção natural dos gases que favorecem este fenômeno tem sido multiplicada desde o início da era industrial, devido fundamentalmente à atividade humana.

O principal gás causador do efeito estufa é o vapor de água. Não obstante, os mais nocivos são os produzidos pelo homem, como o dióxido de carbono (CO_2) e, em menor grau, o metano (CH_4), os óxidos de nitrogênio (N_2O) e os halocarbonetos (CFC's).

▪ **Degradação da camada de ozônio:** O ozônio é uma forma de oxigênio cuja molécula tem três átomos (O_3), diferentemente das duas do oxigênio comum. Por isso, é quimicamente instável e muito vulnerável a ser destruído por componentes que contenham nitrogênio, hidrogênio ou cloro. Este gás pode ser encontrado na estratosfera (entre 20 e 50 km a partir da superfície terrestre) em uma proporção de 0,0001%, onde as radiações ultravioletas do sol decompõem as moléculas de oxigênio em átomos, os quais, por sua vez, combinam-se com outras moléculas de oxigênio para formar o ozônio; e na camada inferior da atmosfera ou troposfera (entre a superfície terrestre e os 10 km de altura), na qual constitui um perigoso veneno que pode afetar o sistema respiratório e a vegetação.

Durante o processo de decomposição das moléculas de oxigênio em átomos livres e posterior formação do ozônio, é liberado calor, com conseqüente destruição dos raios ultravioletas, que por sua vez são prejudiciais aos seres vivos. Essa produção de energia é a causa da inversão térmica que se produz nos primeiros níveis da estratosfera, chegando a alcançar temperaturas de até 30°C acima de zero.

Definitivamente, o ozônio estratosférico atua como um manto protetor da Terra ao absorver as radiações ultravioletas UVB e UVC (radiações solares de alta energia e de baixo comprimento de onda), nocivas para os seres vivos. Portanto, a degradação da camada de ozônio foi julgada bastante grave pela comunidade internacional através do protocolo de Montreal, o qual entrou em vigor em 1º de janeiro de 1989 e tem como meta banir os CFC's.

Na tabela 5.4, a seguir, estão resumidas as principais classes e subclasse de impactos como também a escala geográfica do impacto.

Tabela 5.4 - Classificação dos impactos

Classe	Subclasse	Escala geográfica do impacto
Esgotamento de recursos naturais		Global ou Regional
Efeito Estufa		Global
Degradação da camada de ozônio		Global
Toxicidade e Eco-toxicidade	Toxicidade: homem, fauna, flora e ecossistemas.	Local
	Acidificação	Regional
	Eutroficação	Local
Alteração física dos ecossistemas		Local ou Regional

5.3.2 - Indicadores de impacto:

Nos últimos anos, numerosos indicadores foram propostos. Entretanto, não existe ainda método quantitativo e operacional para todas as classes de impactos, como por exemplo, as alterações físicas dos ecossistemas. Por isso, neste trabalho, somente os indicadores, que já são consenso e são operacionais, são considerados. Para cada classe ou subclasse de impacto, o indicador avaliado sobre o sistema i é indicado por I^i e, todos os fluxos de matéria (fatores de impacto) são implicitamente correlacionados à unidade funcional do sistema, a saber, um milheiro de tijolo.

- **Esgotamento de recursos naturais:** Três indicadores representando os parâmetros deste impacto têm sido propostos:
 - Indicador relativo à quantidade de matéria consumida pelo sistema;
 - Indicador relativo ao estado dos reservas;
 - Indicador relativo à renovabilidade dos recursos.

Considerando:

m_j^i (kg) = matéria-prima j consumida pelo sistema i ;
 mr_j^i (kg) = recurso renovável j consumido pelo sistema i ;
 mnr_j^i (kg) = recurso não renovável j consumido pelo sistema i ;
 R_j (kg) = reservas mundial do recurso j ;
 G_j (kg ano⁻¹) = consumo mundial anual do recurso j ;
 P_j (kg ano⁻¹) = taxa anual de renovabilidade do recurso j ;
 M_j (kg ano⁻¹) = produção anual do recurso j ;
 T_j (adimensional) = tempo relativo de renovabilidade do recurso j .

A relação $\frac{R_j}{G_j}$ representa o período de disponibilidade do recurso j em nível mundial.

Mas, é bom deixar claro que de acordo os objetivos da análise de ciclo de vida, esses índices podem ser modificados em função dos recursos regionais ou locais.

Todo sistema será considerado respeitoso ao ambiente quando seu consumo de matéria-prima, sua contribuição ao esgotamento das reservas e a não renovabilidade dos recursos consumidos forem menores. Os principais indicadores relativos ao esgotamento das reservas estão listados na tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Indicadores relativos ao esgotamento das reservas

Indicador relativo a:	Fórmula do indicador ($I^i =$)	Unidade	Referência bibliográfica
Consumo de matéria-prima pelo sistema i	$\sum_j m_j^i$	kg	CHRISTIANSEIN, 1991
Estado das reservas dos recursos consumidos pelo sistema i	$\sum_j m_j^i \times \frac{1}{R_j}$	Adimensional	GUINEE et al., 1992
	$\sum_j m_j^i \times \frac{G_j}{R_j}$	Kg.ano ⁻¹	ANNEMA, 1992
	$\left(\sum_j m_j^i \times \frac{G_j}{R_j} \right) / \sum_j m_j^i$	Ano ⁻¹	ROUSSEAUX, 1993
Renovabilidade dos recursos consumidos pelo sistema i	$\frac{\sum_j mnr_j^i}{\sum_j m_j^i}$	Adimensional	BERKEL and CRUL, 1990
	$\sum_j mnr_j^i \times \frac{G_j}{R_j^2}$ e $\sum_j mr_j^i \times \left(\frac{G_j - P_j}{R_j^2} \right)$	Ano ⁻¹	SETAC, 1992
	$\sum_j mr_j^i \times \frac{M_j}{R_j}$	ano ⁻¹	GUINEE et al., 1992
	$\frac{\left[\sum_j m_j^i \times \left(1 - \frac{1}{T_j} \right) \right]}{\sum_j m_j^i}$	adimensional	ROUSSEAUX, 1993

- **Efeito estufa:** O uso do *Global Warming Potential (GWP)* definida pela *IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)* (IPCC, 1992) é o mais recomendado na atualidade. O *GWP* expressa, para um gás, o fluxo de raios infravermelhos que ele é capaz de absorver em comparação com o CO₂. A contribuição do efeito estufa de substâncias gasosas *j* emitidas pelo subsistema *i* é dada pela seguinte fórmula:

$$I^i = \sum_j m_j^i \times GWP_j$$

Sendo I^i (kg equivalente CO₂): indicador da contribuição ao efeito estufa do sistema *i*;

m_j^i (kg): massa da substância gasosa *j* com efeito estufa liberada pelo sistema *i*;

GWP_j (adimensional): potencial de aquecimento global da substância *j*.

A tabela 5.6 oferece valores fornecidos pelo IPCC para a avaliação do efeito relativo à emissão instantânea de 1 kg de gás com efeito estufa, em comparação com o dióxido de carbono num período de tempo T.

Tabela 5.6 – Fatores de emissões relativos a emissão instantânea de 1 kg de gás, (IPCC, 1992)

	<i>GWP</i> (T = 20 anos)	<i>GWP</i> (T = 100 anos)	<i>GWP</i> (T = 500 anos)
CO ₂	1	1	1
CH ₄	35	11	4
N ₂ O	260	270	170
CO	0	0	0
NO ₂	320	290	180

- **Degradação da camada de ozônio:** A contribuição à degradação do ozônio estratosférico de substâncias gasosas *j* liberadas por um subsistema *i* é dada pela fórmula (IPCC, 1992):

$$I^i = \sum_j m_j^i \times ODP_j$$

sendo I^i (kg equivalente de CFC 11): indicador da contribuição à degradação do ozônio estratosférico do sistema i .

m_j^i (kg): massa da substância gasosa j com efeito estufa liberada pelo sistema i ;

ODP_j (adimensional): Potencial de degradação da camada de ozônio da substância j .

O ODP indica, para uma emissão de 1 kg de gás, seu poder de degradação do ozônio em relação a uma mesma emissão de CFC 11.

Tabela 5.7 - ODP - Potencial de Deterioração da camada de ozônio, (IPCC, 1992)

Substância	Fator ODP
CFC 11	1
CFC 113	0,8
CH ₄	0,38

○ **Acidificação:** a aproximação mais utilizada hoje em dia é a equivalência em ácido (GUINEE et al., 1992). A contribuição à acidificação de uma substância j liberada através de um sistema i é dada pela fórmula:

$$I^i = \sum_j m_j^i \times AP_j$$

I^i (kg equivalência SO₂) é a contribuição à acidificação do sistema i ;

m_j^i (kg) é a massa da substância j liberada pelo sistema i ;

AP_j (adimensional) é o potencial de acidificação da substância j .

Alguns valores de **AP** estão disponibilizados na tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Potencial de acidificação (AP) das principais substâncias ácidas

Substância	SO ₂	NO	NO ₂	NH ₃	HCl	HF
AP	1	1,07	0,70	1,88	0,88	1,60

○ **Eutroficação:** Os indicadores do CML (GUINEE et al., 1992) que consideram a composição média das algas (ou seja, C₁₀₆H₂₆₃O₁₁₀N₁₆P) como representativa da composição média da biomassa são os mais indicados. A contribuição à eutroficação das substâncias **j** liberadas pelo sistema **i** é dada pela fórmula:

$$I^i = \sum_j m_j^i \times NP_j$$

I^i (kg equivalência PO_4^{3-}) é o potencial de eutroficação do sistema **i**;

m_j^i (kg) é a massa da substância **j** liberada pelo sistema **i**;

NP_j (adimensional) é o potencial de eutroficação da substância **j**.

Tabela 5.9 - Potencial de eutroficação (NP) das principais substâncias à base de azoto e fósforo.

Substância	N	NO	NO ₂	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	P	PO ₄ ³⁻
NP	0,42	0,20	0,13	0,10	0,33	3,06	1,00

Tabela: 5.10 - Resumo dos fatores de equivalências ambientais

	Chuva ácida (kg SO ₂ eq./kg)	Toxidade humana (kg 1,4 DCB eq./kg)	Ozônio à baixa altitude (kg CFC – 11 eq./kg)	Eutroficação (kg PO ₄ ³⁻ eq./kg)	Aquecimen- to global (kg CO ₂ eq. Kg)	Redução de energia
CO ₂					1,00	
CO		0,012				
CH ₄			0,38		35,00	
N				0,42		
NO	1,07			0,20		
NO ₂	0,70	0,78		0,13	320,00	
N ₂ O					260,00	
SO ₂	1,00	1,20				
SO ₃	0,80					
CF ₄			1,20		1.400,00	
SF ₆					23.900,00	
H ₃ PO ₄	0,98			1,00		
HCl	0,88					
NH ₃	1,88			0,35		
P ₂ O ₅				1,34		
PO ₄ ³⁻				1,00		
Energia						1,00

Fonte: HEIJUNGS et al., 1992

5.3.3 - Quantificação das contribuições aos impactos

5.3.3.1 - Plantio de capim

A emissão de amônia (NH₃) em solos fertilizados é essencialmente um processo físico-químico e dependente do tipo de fertilizante, em alguns casos do pH do solo e das condições climáticas (HARRISON, 2001). Emissões devidas à aplicação de uréia são tipicamente as mais altas podendo variar de 6 a 47 % de N aplicado. Outros tipos de fertilizante (nitrato de amônia) demonstram emissões na ordem de 1 – 2 % de N aplicado. Emissões de NH₃ devidas à aplicação de sulfato de amônia, como é o caso do fertilizante utilizado no plantio do capim, tem-se mostrado alta, dependendo do pH do solo. Na literatura, fatores de emissão de 2 % para solos com pH < 7 e 18 % para solos com pH > 7 são sugeridos. Como os solos de Nova Odessa e

Brotas têm pH de 4 e 3,9, respectivamente, se adaptou o fator de emissão de 2 % para o cálculo das emissões de NH₃.

N₂O é um gás de efeito estufa persistente produzido, naturalmente, em solos cultivados através do processo de nitrificação e desnitrificação. A produção de N₂O é função das práticas agrícolas, processos biológicos, propriedades do solo e condições climáticas (EICHNER, 1990). A adição de nitrogênio nos sistemas agrícolas na forma de fertilizante sintético provoca sua fixação, que por sua vez aumenta a formação de N₂O, embora esta formação seja também regulada por fatores como temperatura, pH e teor de umidade do solo. Devido à limitada disponibilidade de dados relacionados à colheita, solos e fatores climáticos, o *IPCC Guidelines* recomenda uma estimativa direta das emissões de N₂O resultantes da adição de fertilizante sintético como uma simples função da amostra de fertilizante adicionando: N₂O-N emitido = 1,25 ± 1 % de N adicionado (IPCC, 1996). Essa relação proporciona uma estimativa da magnitude das emissões de N₂O e será usada neste estudo.

Além das emissões devidas ao uso de fertilizantes, foram estimadas também as emissões ao uso do óleo diesel no corte, no empilhamento e no enfardamento, todas referenciadas à unidade funcional que é um milheiro de tijolo. Com um consumo médio de 45 m³ de Capim Elefante por fornada de 30.000 tijolos e densidade volumétrica do Capim Elefante de 120 kg/m³ conclui-se que o consumo de capim elefante por milheiro de tijolos é de 180 kg de Capim Elefante por milheiro. De acordo com as considerações já feitas no capítulo introdutório, o consumo de óleo diesel por tonelada de capim processada é de 7,83 litros, ou seja, de 1,4 litros de óleo diesel para processar a quantidade necessária para queimar um milheiro de tijolo.

Na tabela 5.11, está resumida a estimativa das emissões para o subsistema do plantio do Capim Elefante.

Tabela 5.11 - Estimativa das emissões devido ao plantio de Capim Elefante.

Poluente	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO	NO _x	Particulados	N	P ₂ O ₅	NH ₃
Emissões (kg)	24,02	0,29	64,8	0,33	0,26	0,06	800,00	375,00	16

5.3.3.2 - Extração de argila

Os impactos ambientais decorrentes da extração da argila podem se dar ou ocorrer em nível local ou regional, dependendo do porte do empreendimento, de sua localização, das características ambientais e sociais do entorno e das características da jazida e da tecnologia de lavra e tratamento utilizado.

Cabe enfatizar que o termo poluição significa qualquer forma de matéria ou energia lançada ao meio ambiente que possa afetar negativamente o homem e outros organismos. Dessa forma, o conceito de poluição é bem mais restrito que o de impacto ambiental. Com efeito, um empreendimento pode, de fato, causar impacto ambiental sem poluir.

Para a etapa de extração de argila, foi adotada a verificação das emissões devidas a mineração a céu aberto. Verificou-se que a emissão de poluentes geradas pelas atividades extrativas e pós-extrativas é principalmente metano e pela queima do óleo diesel são os materiais particulados, o CO₂, o CO, o NO_x e o SO_x.

A equação que permite calcular as emissões de CH₄ imputáveis às atividades minerais é expressa como:

$$\text{Emissões de CH}_4 \text{ (Gg)} = \text{Produção de argila (10}^6\text{ton.)} * \text{Fator de emissão (m}^3\text{ CH}_4\text{/ton. de argila)} * \text{Fator de conversão (Gg CH}_4 / 10^6 \text{ m}^3 \text{ CH}_4\text{)}$$

Considerou-se que para a produção de um milheiro de tijolo são necessários dois metros cúbicos de argila. Para extrair esta quantidade, o consumo em diesel da retroescavadeira é de cerca de vinte e cinco litros. A tabela 5.12 mostra a emissão de CH₄ por unidade funcional, ou seja, por quantidade de argila extraída para a produção de um milheiro de tijolo. Já a tabela 5.13 mostra os fatores de emissões para maquinário de lavra. E a tabela 5.14 mostra a quantificação das emissões devido ao consumo de combustível na atividade de escavação.

Tabela 5.12 - Emissão de CH₄ devido à atividade de extração de argila.

	A	B	C = (A*B)	D	E
	Quantidade de argila para produção de um milheiro de tijolos (10 ⁶ t)	Fator de emissão (m ³ CH ₄ /t)	Emissão de CH ₄ (10 ⁶ m ³)	Fator de conversão (0,67 Gg CH ₄ /10 ⁶ m ³)	Emissão de CH ₄ (Gg CH ₄)
Atividades extrativas	214*10 ⁻⁷	2,5	535*10 ⁻⁷	0,67	358,45*10 ⁻⁷
Atividades pós-extrativas	214*10 ⁻⁷	0,1	214*10 ⁻⁸	0,67	14,33*10 ⁻⁷
Total					37,2 kg CH ₄

Tabela 5.13 - Fatores de emissões para maquinas de mineração - retroescavadeira

Poluente	NO _x (gNO _x /l diesel)	CO (gCO/l diesel)	CO ₂ (gCO ₂ /l diesel)	Particulados (gPM/l diesel)	SO ₂ (gSO ₂ /l diesel)
Fator de emissão	38,5	15,5	2466,2	5,8	0,8

Fonte: GOVER et al., 1996 in BAUEN, 1999

Tabela 5.14 - quantificação das emissões devido ao consumo de combustível na atividade de escavação.

Poluente	NO _x	CO	CO ₂	Particulados	SO ₂
Emissões (kg)	0,96	0,39	61,65	0,15	0,02

5.3.3.3 - Transporte

A argila e o Capim Elefante devem ser transportados da jazida e do plantio, respectivamente, para a planta de produção de cerâmica. Emissões de gases de efeito estufa originados de seus transportes incluem dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), metano (CH₄) e componentes orgânicos voláteis não metano, os quais são estimados de acordo com os de emissões mostrados na tabela 5.15 (IPCC, 1996).

Tabela 5.15 - Fatores de emissões para veículos de carga com consumo de 13,3 l / 100km (IPCC,1996)

	NO _x	CH ₄	NMVOC	CO	N ₂ O	CO ₂
Valor médio (g/km)	0,67	0,01	0,24	0,61	0,014	319
Valor médio (g/kg de combustível)	6,62	0,12	2,39	6,04	0,14	3172,31
Valor médio (g/MJ)	0,150	0,003	0,054	0,137	0,003	72,098

Tabela 5.16 - Quantificação das emissões na etapa de transporte da argila e do Capim Elefante.

	NO _x	CH ₄	NMVOC	CO	N ₂ O	CO ₂
Distância (km)	120	120	120	120	120	120
Total (kg)	0,0804	0,0012	0,0288	0,0732	0,00168	38,28

5.3.3.4 - Combustão

Muitas das emissões, durante a etapa de combustão, são funções da composição elementar da biomassa. Emissões outras que os hidrocarbonetos, na exceção dos NO_x, se limitam à quantidade de enxofre presente na biomassa. O enxofre presente na biomassa, tipicamente inferior a 0,1 % da massa da biomassa em base úmida, tem o potencial de formar H₂S e SO_x. Outra fonte de formação de SO₂ está na própria produção do tijolo no sentido que estas emissões resultam do enxofre presente na argila. Cerca de 45 % de SO₂, gerada no decorrer do processo, será seqüestrado no produto (tijolo). Caso não haja informações específicas disponíveis, o IPCC recomenda um fator de cerca de 0,5 kg de SO₂ por tonelada de produto.

Duas fontes de nitrogênio são o próprio insumo energético (cerca de 1,8 %, base úmida) e o ar de combustão. O nitrogênio tem o potencial de forma NO_x durante o processo de queima. A formação inicial de NO_x deve-se, principalmente, ao excesso de ar e ao teor de umidade do insumo (SCHULTZ and KITTO, 1992). A concentração dos óxidos de nitrogênio “térmicos” cresce linearmente com o acréscimo da concentração de oxigênio atômico e exponencialmente com a temperatura. Óxidos de nitrogênio “térmicos” são formados da alta temperatura, cerca de 1200°C. Devido ao fato que os fornos nos processos de queima de produtos cerâmicos são operados a temperaturas de no máximo entre 950 e 1050°C, a formação de quase a totalidade de NO_x deve-se ao insumo energético.

Os seguintes fatores de emissões para combustão de biomassa e resíduos agro-florestais e municipais foram desenvolvidos pelo IPCC, tabela 5.17.

Tabela 5.17 - Fatores de emissões para combustão da biomassa e resíduos agro florestais (IPCC, 1996)

	SO ₂ (kg/t produto)	NO _x (kg/Tj)	CH ₄ (kg/Tj)	NMVOC (kg/Tj)	CO (kg/Tj)	N ₂ O (kg/Tj)
Fator de emissão	0,5	100	30	50	4000	4

Para todos os cálculos das emissões de gases causadores do efeito estufa provenientes de processos de combustão é considerada a relação entre a quantidade de combustível consumida para a queima de um milheiro de tijolo oito furos e a quantidade de carbono existente em sua composição.

Tabela 5.18 - Quantificação das emissões na etapa da queima dos produtos cerâmicos.

	SO ₂	NO _x	CH ₄	NMVOC	CO	N ₂ O	CO ₂
Emissão (kg)	1,25	1,97	0,59	0,99	79,07	0,08	269,20

Tabela 5.19 – Cálculo das emissões de CO₂ devido a combustão do Capim Elefante para a produção de 1 milheiro de tijolo

Quantidade de capim necessário para a queima de 1 milheiro (kg)	Teor de carbono presente no Capim Elefante (%)	Carbono presente na Quantidade capim necessário para a queima de 1 milheiro (kg de C)	Fração de carbono oxidado durante a combustão do capim	Emissões reais de carbono (kg de C)	Emissões reais de CO ₂ (kg de CO ₂)
180	41,2	$\frac{180 * 41,2}{100} = 74,16$	0,99	73,42	$73,42 * \frac{44}{12} = 269,20$

Para comparar as emissões reais de CO₂ resultante da queima do Capim Elefante com as emissões reais no caso onde o combustível utilizado é o óleo combustível, partimos da consideração de que a energia necessária é a mesma. Portanto a quantidade de óleo combustível necessária para queimar 1 milheiro de tijolo é

$$\frac{\text{Energia necessária}}{PCI_{\text{óleo}}} = \frac{180\text{kg} \times 13,4\text{MJ} / \text{kg}}{42,69\text{MJ} / \text{kg}}$$

ou seja serão necessários 56,5 kg de óleo combustível para a queima do mesmo milheiro de tijolo.

Tomando como hipótese que na queima do óleo diesel a quantidade de carbono emitido é muito próxima do teor de carbono contido no óleo diesel antes da queima. Esse valor é da ordem de 3,17 kg de CO₂ por kg. Teremos então 179,10 kg de CO₂ de emissões reais por milheiro.

Pode-se observar também a quantidade de CO₂ para um milheiro de tijolo, isso é, considerando o plantio, a extração da argila, o transporte e a queima, no caso do Capim Elefante e extração da argila e queima com óleo combustível:

Total para o Capim Elefante:

$$24,02 + 61,55 + 38,28 + 269,20 = 393,15 \text{ kg de CO}_2/\text{milheiro}$$

Total para o óleo combustível:

$$61,55 + 179,10 = 240,65 \text{ kg de CO}_2/\text{milheiro}$$

Embora a diferença seja 152,5 kg de CO₂/milheiro “em favor” do óleo combustível, na realidade a porção de 269,20 do Capim Elefante vem do próprio CO₂ da atmosfera. Portanto, sem considerar esta porção o total do Capim Elefante seria de 123,95 kg de CO₂/milheiro, portanto em favor do Capim Elefante é de **116,7 kg de CO₂/milheiro**

A planilha de inventários resumindo todos os dados obtidos anteriormente pode ser vista na tabela 5.20. Através desta planilha, obteve-se a quantidade de energia média total consumida para a produção de um milheiro de tijolo, bem como as emissões médias totais para o ar.

Tabela 5.20 - Planilha de inventário da análise de ciclo de vida do processo produtivo de cerâmica estrutural em relação a um milheiro de tijolos.

Contribuição	Unidade	Plantio de Capim	Extração da argila	Transporte rodoviário	Produção de tijolo	Total
ENERGIA						
Energia	GJ	0,044	1,046	0,667	1,822	3,58
EMISSIONES PARA O AR						
CO ₂	Kg	24,02	61,65	38,28	269,20	393,15
N ₂ O	Kg	64,80	-	1,68*10 ⁻³	0,08	64,88
CH ₄	Kg	0,29	37,20	1,20*10 ⁻³	0,59	38,08
SO ₂	Kg	-	0,02	-	1,25	1,27
CO	Kg	0,33	0,39	7,32*10 ⁻²	79,07	79,79
NO _x	Kg	0,26	0,96	8,04*10 ⁻²	1,97	3,27
Particulados	Kg	0,065	0,15	2,88*10 ⁻²	0,99	1,23
NH ₃	Kg	19,60	-	-	-	19,60

A tabela 5.20 mostra que a principal fonte de emissão de CO₂ no ciclo de vida do processo produtivo de cerâmica estrutural é a etapa de produção de tijolo (formatação e queima). Mas uma importante parte deste CO₂ liberada durante a queima dos produtos cerâmicos é o CO₂ absorvido pelo Capim Elefante durante o seu crescimento. Dos quatros subsistemas considerados nesta análise de ciclo de vida (produção de insumo energético, extração de matéria-prima, transporte e produção de tijolo), a produção de insumo energético apresentar a menor emissão de CO₂ por unidade funcional.

O transporte requer menos recursos e também tem menos participação nas emissões. Isto se deve principalmente à localização da indústria de cerâmica estrutural, perto das locais de extração da matéria-prima e do insumo energético. Entretanto, qualquer mudança nesta vizinhança ou no sistema de transporte da matéria-prima e do insumo energético deverá implicar em algum efeito, porém, nada de muito significativo que possa vir a mudar o quadro geral dos impactos do sistema na sua totalidade com o ambiente.

A principal contribuição nas emissões do processo de extração argila está nas liberações de gás metano.

5.3.3.5 - Cálculo dos impactos

Tabela 5.21 - Impactos totais não normalizados

	Chuva ácida (kg SO ₂ eq.kg)	Toxidade humana (kg 1,4 DCB eq./kg)	Ozônio a baixa altitude (kg CFC – 11 eq./kg)	Eutroficação (kg PO ₄ ³⁻ eq./kg)	Aquecimento global (kg CO ₂ eq. Kg)	Consumo de energia GJ
Plantio de capim elefante	37,31	0,21	0,11	844,59	17005,35	0,044
Extração de argila	1,72	0,78	14,14	0,32	1670,85	1,046
Transporte	0,14	0,06	0,0004	0,026	64,47	0,667
Processo de queima	4,73	3,99	0,23	0,65	2817,45	1,822
Total	43,9	5,04	14,48	845,58	21558,12	3,58

Tabela 5.22 - Impactos totais não normalizados expressos em porcentagens

	Chuva ácida %	Toxicidade humana %	Ozônio a baixa altitude %	Eutroficação %	Aquecimento global %	Consumo de energia %
Plantio de Capim Elefante	84,99	4,17	0,76	99,88	78,88	1,21
Extração de argila	3,92	15,47	97,65	0,03	7,75	29,27
Transporte	0,32	1,2	0,003	0,02	0,3	18,63
Processo de queima	10,77	79,16	1,56	0,07	13,07	50,89
Total	100	100	100	100	100	100

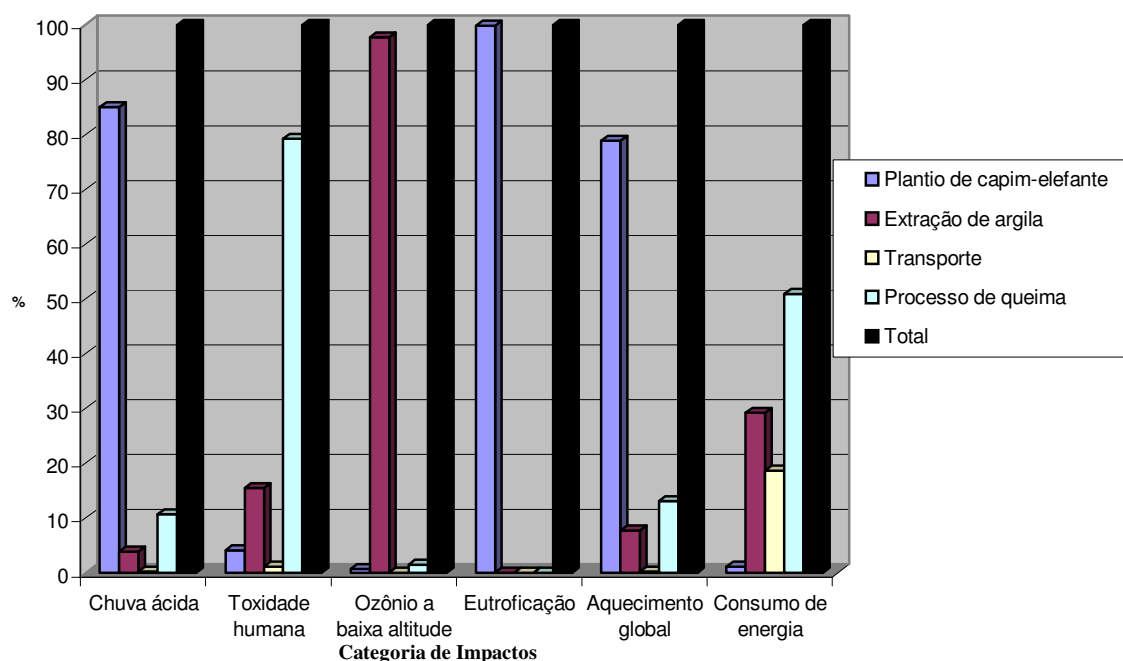


Figura 5.6 – Impactos totais não normalizados

A acidificação do solo e da água é um dos resultados do uso de altas doses de fertilizantes. Isto representa um risco de impacto considerável para a vegetação local, principalmente, devido a presença de metais pesados no solo. 84,99% da acidificação é devido a produção do insumo energético. Uma explicação pela contribuição alta do insumo energético na etapa de produção pode ser dada pelas altas doses de fertilizantes nitrogenados aplicados durante o plantio e também

pela hipótese assumida de que 1% de todo o fertilizante nitrogenado aplicado evapora na forma de NH_3 . 10,77 % de todo o potencial de acidificação no processo produtivo de cerâmica estrutural é devido a etapa de queima dos produtos cerâmicos e 3,92 % pela extração da argila.

Em escala local observa-se que o processo de produção do Capim Elefante tem contribuição na acidificação, na eutroficação e no aquecimento global. Isso é, também, resultado do maquinário utilizado nas operações de formação e de manutenção da área cultivada e, sobretudo da volatilização dos produtos químicos presentes no fertilizante.

A principal causa da toxicidade humana está nas emissões de metais pesados como consequência da queima da argila e do Capim Elefante.

Assim como os poluentes atmosféricos não permanecem restritos aos limites impostos por fronteiras territoriais entre países, os efeitos da poluição do ar provocados por esses poluentes, de igual maneira abrangem uma escala de natureza global. A normalização dos impactos visa produzir uma visão global das emissões e da redução de energéticos, trabalhando com a mesma unidade e descrevendo assim o perfil ambiental de suas unidades funcionais em números normalizados e absolutos, podendo então ser comparados a outros perfis ambientais. Em função disso, é preciso chegar a um consenso mundial sobre a necessidade de promover convenções internacionais para tratar do assunto, bem como propor limites para a emissão de certos poluentes. Já existem na literatura fatores de normalização mundial para as diferentes regiões do mundo.

Tabela 5.23 - Fatores para normalização de impactos (HUIJBREGTS et al., 2001)

	Holanda	Europa	Mundo
Chuva ácida, kg (SO_2 eq.). ano ⁻¹	$6,69 \cdot 10^{+8}$	$2,74 \cdot 10^{+10}$	$3,13 \cdot 10^{+11}$
Toxicidade humana, kg (1,4 DCB eq.) ano ⁻¹	$1,88 \cdot 10^{+11}$	$7,57 \cdot 10^{+12}$	$5,71 \cdot 10^{+13}$
Ozônio a baixa altitude, kg (CFC – 11 eq.) ano ⁻¹	$9,77 \cdot 10^{+5}$	$8,30 \cdot 10^{+7}$	$1,14 \cdot 10^{+9}$
Eutroficação, kg (PO_4^{3-} eq.) ano ⁻¹	$5,02 \cdot 10^{+8}$	$1,25 \cdot 10^{+10}$	$1,32 \cdot 10^{+11}$
Aquecimento global, kg (CO_2 eq.) ano ⁻¹	$2,51 \cdot 10^{+11}$	$4,73 \cdot 10^{+12}$	$4,45 \cdot 10^{+13}$
Energia, GJ. Ano ⁻¹ .	-	-	$235,00 \cdot 10^9$

A tabela 5.24 mostra os impactos ambientais normalizados decorrentes da análise do ciclo de vida do processo produtivo de cerâmica estrutural.

Tabela 5.24 – Impactos ambientais normalizados

	Chuva ácida (kg SO ₂ eq.kg)	Toxicidade humana (kg 1,4 DCB eq./kg)	Ozônio a baixa altitude (kg CFC – 11 eq./kg)	Eutroficação (kg PO ₄ ³⁻ eq./kg)	Aquecimento global (kg CO ₂ eq. Kg)	Energia GJ
Total	43,9	5,04	14,48	845,58	21558,12	3,58
Fator de normalização	3,13*10 ⁺¹¹	5,71*10 ⁺¹³	1,14*10 ⁺⁹	1,32*10 ⁺¹¹	4,45*10 ⁺¹³	235,00*10 ⁹
Total normalizado (Ano*10 ⁻¹¹)	14,02	88,00	1270,00	640,59	48,44	1,52

Observa-se que o maior impacto resultante do ciclo de vida do processo produtivo de cerâmica estrutural é a produção de ozônio a baixas altitudes. Isso ocorre em função da presença de hidrocarbonetos junto à argila, e que estes poluentes são emitidos, em sua grande maioria, pela queima da argila durante o processo de produção de tijolos. Como as olarias não possuem equipamentos de prevenção da poluição atmosférica, o resultado obtido está coerente.

5.3.4 - Interpretação dos resultados e resposta aos objetivos estabelecidos

5.3.4.1 - Extração da argila *in natura*.

A exploração das camadas superficiais de argila é realizada a céu aberto, durante os períodos de seca, de forma manual, nas empresas de pequeno porte, ou através da utilização de pás carregadeiras e caminhões basculantes, naquelas de médio e grande porte. Mesmo estas últimas não possuem equipamentos apropriados à exploração racional das jazidas. Em se utilizar apenas as camadas superficiais, faz com que a profundidade média de exploração fique

condicionada entre 3 e 4 m. Como consequência, há uma forte pressão pelo uso do solo, propiciando a abertura de novas áreas, com as mazelas resultantes: desmatamento, crescimento de áreas degradadas, expulsão da fauna nativa, assoreamento de rios, erosão de áreas próximas aos cursos d'água, aumento da poluição atmosférica, etc. As fotografias abaixo mostram esta realidade.



Figura 5.7 - Áreas degradadas.

5.3.4.2 - Produção do Capim Elefante

Com efeito, se os empresários utilizassem equipamentos mais sofisticados, que pudessem aprofundar a exploração das jazidas, sem dúvida as áreas degradadas teriam notável redução.

As operações associadas com a produção e o transporte da biomassa são fontes de emissões e têm outras conseqüências que podem conduzir a impactos ambientais e socioeconômicos. As etapas de implantação, crescimento e exploração deverão estar sob estrito controle, principalmente, em relação ao uso de produtos químicos (fertilizantes, pesticidas e formicidas). Os resultados (tabela 4.18) indicam que no processo de produção do Capim Elefante os principais impactos estão associadas com as emissões devidas ao N_2O e NH_3 . Como já foi dito, isto é resultante das altas doses de fertilizante nitrogenado utilizado. O Nitrogênio é um nutriente essencial, entretanto quando presente em excesso pode causar mudanças na fauna e na flora. O uso excessivo de nitrogênio pode resultar também numa formação microbiana de N_2O contribuindo no aquecimento global e na deterioração da camada de ozônio. A minimização do uso de fertilizantes e pesticidas é de fundamental importância visto que durante a aplicação eles podem se volatilizar e contaminar o ar e terem efeitos negativos sobre a saúde humana.

5.3.4.3. - Análise energética

A análise energética é parte da análise do ciclo do combustível que por sua vez é parte integrante da análise do ciclo de vida e, é utilizada para avaliar a quantidade de energia necessária para produzir um determinado produto. O largo potencial energético associado ao Capim Elefante já foi discutido no capítulo primeiro. A estimativa deste potencial é cercada de incerteza até se chegar a valores práticos. Estes valores dependem muito de políticas agrícolas, de medidas de conservação florestais e, sobretudo de disponibilidades de recursos que no caso da “capincultura” não devem ser muito elevados.

5.3.4.4 - Processo de queima ou de produção

A análise ambiental tem focalizado o processo de queima ou de produção dos tijolos como etapa de maior consumo de energia (51 %) e também de maior contribuição à toxicidade humana (80 %). Este alto índice se deve principalmente a exposição dos operários às fumaças resultantes do processo de queima, mas acima de tudo pelo uso de equipamento de proteção e de prevenção de poluição atmosférica.

Existem diversas possibilidades de intervenção no ciclo produtivo, proporcionando a redução dos poluentes atmosféricos emitidos. A eficiência de tais intervenções depende da conformidade entre as medidas adotadas e os objetivos propostos. Segundo BUSANI et al. (1995) as principais medidas de prevenção devem visar basicamente:

- Reduzir ao mínimo o risco toxicológico para o meio ambiente;
- Conter a dispersão de poluentes;
- Otimizar o transporte dos gases no sistema de aspiração, de forma a atender as exigências de preservação ambiental, bem como otimizar o consumo energético.

Capítulo 6

Análise técnico - econômica do processo produtivo de cerâmica estrutural usando Capim Elefante como insumo energético

A avaliação de projeto em um ambiente que não seja sujeito à incerteza é bastante conveniente. Entretanto, a realidade mostra que pouco, ou nada pode ser tomado como certo. Na economia isto é ainda evidente, pois as variáveis estão ligadas a parâmetros de grande incerteza. É necessário dizer que o risco é uma consequência da incerteza. Quanto mais se reduz as incertezas menores serão os riscos. Logo, uma maneira de se reduzir os riscos de um projeto é o aprofundamento dos estudos prévios (HADDAD, 2000).

Entende-se por custo de produção a soma dos valores de todos os recursos (insumos) e operações (serviços) utilizados no processo produtivo de certa atividade (produção de tijolo, especificamente neste caso).

A Teoria da Produção e a Teoria dos Custos de Produção constituem a chamada Teoria da oferta da firma Individual. Esses temas foram inicialmente tratados pela Teoria Econômica e com o decorrer do tempo, foram incorporadas nas áreas da Contabilidade, Engenharia e Administração.

Para VASCONELLOS e GARCIA (2001), os princípios da Teoria da Produção e da Teoria dos Custos de Produção são peças fundamentais para a análise dos preços e do emprego dos fatores, assim como de sua alocação entre os diversos usos alternativos na economia. Assim

sendo, a Teoria da Produção e a Teoria dos Custos de Produção desempenham dois papéis extremamente importantes:

- a) Servem de base para a análise das relações existentes entre produção e custos de produção;
- b) Servem de apoio para a análise da procura da firma com relação aos fatores de produção que utiliza.

A Teoria da Produção propriamente dita preocupa-se com a relação técnica ou tecnológica entre a quantidade física de produtos (*outputs*) e de fatores de produção (*inputs*), enquanto a Teoria dos Custos de Produção relaciona a quantidade física de produtos com os preços dos fatores de produção. Ou seja, a Teoria da Produção trata apenas de relações físicas, enquanto a Teoria dos Custos de Produção envolve também os preços dos insumos.

A análise do custo de produção de produto cerâmico (tijolo) é uma tarefa difícil devido ao grande número de variáveis envolvidas: matéria-prima (argila), insumo energético (Capim Elefante), mão-de-obra, instalações, administração e logística. A produção de produto cerâmico é uma atividade que requer uso intensivo de mão-de-obra. Um grande número de pessoas é empregado nas diferentes fases do processo: (i) plantio e colheita do insumo energético, quando é o caso, (ii) extração e transporte da argila e (iii) produção dos tijolos. Todas as etapas existentes durante o processo agregam custos ao preço final dos produtos cerâmicos. Uma análise criteriosa desses fatores que influenciam o custo final do produto cerâmico permite minimizar os custos e aumentar o lucro. A minimização do custo final é o objetivo desta análise, e o custo mínimo total não é necessariamente o somatório de custo mínimo em cada etapa.

Atualmente o preço de mercado do milheiro de tijolo pode variar entre R\$ 150,00 e R\$ 200,00 de acordo com a região do país, sendo que em todos os casos, cerca de 25 % do preço final é devido ao insumo energético (lenha). Diante deste cenário, foi realizada uma análise de viabilidade econômica do uso do Capim Elefante em substituição da lenha, tradicional insumo energético nos processos de queima de material cerâmico.

A olaria estudada trabalhará com dois fornos com capacidade de 30 milheiros cada, em fornadas de 72 horas e totalizando uma produção anual de 7200 milheiros. As perdas de produção estão estimadas em 18 %. Na tabela 6.1 são mostradas as características produtivas da olaria.

Tabela 6.1 - Características produtivas da olaria

Discriminação	Quantidade
Número de fornos	2
Capacidade do forno (milheiro)	30
Número de horas por fornada (hora)	72
Número de horas de funcionamento por dia (hora)	24
Número de dias de funcionamento por ano	360
Número de fornadas por ano	120
Quantidade de tijolos produzidos por ano	7.200
Porcentagem de perdas da produção	18
Perdas anuais de produção	1.296
Quantidade líquida produzida (milheiro)	5.904

No contexto da análise econômica, foi primeiramente realizado um levantamento dos custos envolvidos na implantação e operação da olaria. A implantação de uma linha de produção de produtos cerâmicos (tijolos), requer no mínimo a aquisição de equipamentos do tipo: alimentador linear, desintegrador, misturador, laminador, extrusora monobloco, cortador e esteiras transportadoras. Isto representa um investimento inicial em equipamentos da ordem de R\$ 438.634,00. É importante ressaltar que os custo de equipamentos apresentados na tabela 6.2 foram obtidos de cotação realizada junto ao fabricante de equipamento VERDÉS S.A., <http://www.verdes.com.br> empresa paulista de maquinas e instalações com sede na cidade de Itu.

Tabela 6.2 - Preços das máquinas e equipamentos de produção dos tijolos

Descrição	Qtde	Potência (CV)	Produção estimada (m³/h)	Custo (R\$)
Alimentador linear	1	5	6 a 18	48.717,00
Desintegrador	1	7,5 a 10	9 a 16	25.122,00
Misturador	1	20	6 a 10	50.657,00
Laminador	1	40	-	51.650,00
Extrusora monobloco	1	75	5 a 6	136.391,00
Cortador	1	1	-	32.000,00
Esteiras transportadoras	1	-	-	54.346,00
Quadro elétrico	1	-	-	33.851,00
Ventilador p/secagem	10	1	-	1.500,00
Ventilador p/ resfriamento	2	5	-	400,00
Alimentador de cavaco	2	5	-	4.000,00
Total	22	178,4 a 181,0	-	438.634,00

Para implementação da cadeia produtiva faz-se necessário a construção de dois galpões paralelos de 450 m² cada, com um pé direito de 3,5 m. No primeiro galpão estarão o depósito de argila, o conjunto de equipamentos de secagem e o forno n° 1. No galpão n° 2 ficará o forno n° 2, os depósitos de Capim Elefante e de tijolos e a seção n° 2 de secagem. A figura 6.1 mostra a planta dos galpões.

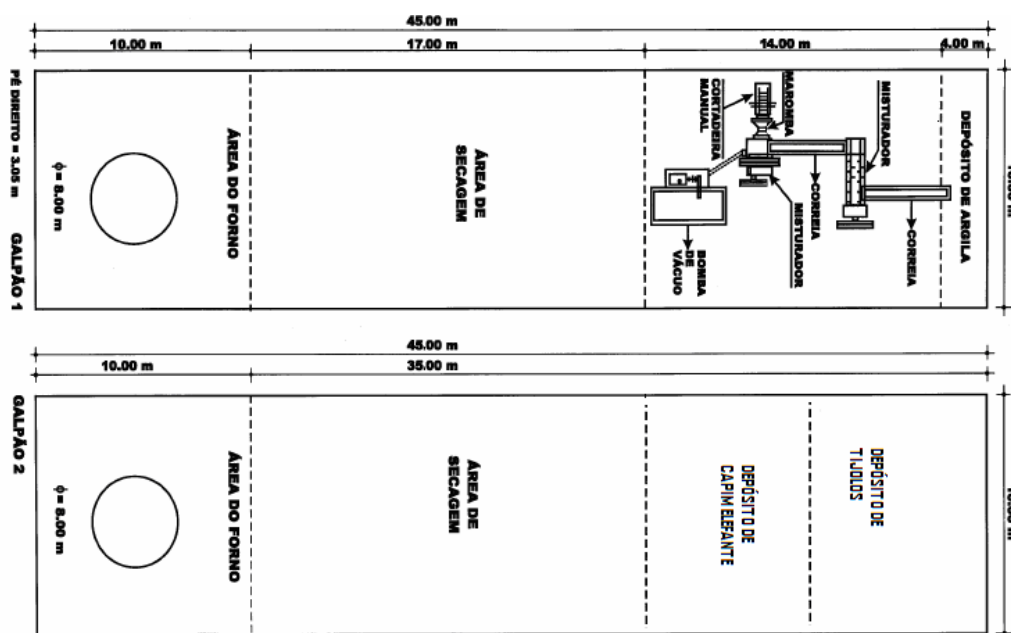


Figura 6.1 - Planta dos galpões

Tabela 6.3 – Investimentos fixos

Investimento fixo	583.547,14
Terreno	45.000,00
Galpão (10% do valor dos equipamentos)	43.863,40
Máquinas e equipamentos	438.634,00
Móveis e utensílios	3.000,00
Veículo	0,00
Eventuais (10% do valor do investimento fixo)	53.049,74

A tabela 6.3 mostra o valor total do investimento necessário à implantação da indústria de cerâmica. Os custos com a construção dos dois fornos foram incorporados nos eventuais que representa 10% do investimento fixo.

A depreciação é o custo necessário para substituir os bens quando tornados inúteis pelo desgaste físico ou obsolescência. Representa a reserva em dinheiro que a empresa faz durante o período de vida útil provável do bem, para sua posterior substituição. A depreciação é usada para estimar a perda de valor de todo bem com vida útil superior a um ciclo produtivo. Somente têm depreciação os bens que possuem vida útil limitada. Portanto o terreno não entra nos bens depreciáveis.

O método mais simples de calcular a depreciação de um bem consiste na sua desvalorização, durante a sua vida útil, de forma constante. É o chamado método linear. A seguinte fórmula pode ser aplicada:

$$Depreciação = \frac{V_i - V_f}{n}$$

Em que:

V_i é o valor inicial do bem, ou seja, o valor que ele foi adquirido, ou até mesmo o seu valor atual;

V_f é valor final ou valor de sucata do bem, ou seja, ao término da vida útil;

n é o número de períodos de vida útil estimada do bem.

Neste trabalho a depreciação dos bens foi considerada como 10 % do valor de aquisição, ao ano, em 10 anos de vida útil. Em relação das despesas com manutenção dos equipamentos elas foram estimadas a uma taxa de 2,5 % do investimento em equipamento.

A escala de funcionamento da indústria será de 3 turnos de 8 horas cada e durante 360 dias/ano. Considerou-se ser necessário 9 operários, sendo que 7 trabalharão durante o turno comercial, auxiliando no processo de formatação, secagem natural, carregamento e descarregamento dos fornos e queima dos produtos cerâmicos e os outros dois funcionários intercalariam dois turnos (vespertino e noturno) na alimentação dos fornos e acompanhamento do processo de queima.

Por outro lado, a capacidade instalada da indústria é de 7.200 milheiros de tijolos por ano. Considerando as perdas em torno de 18 %, a produção anual é estimada em 5.904 milheiros. A venda da produção estimada ao preço atual de mercado de R\$ 200,00 resultará a uma receita bruta de R\$ 1.180.800,00. Esta receita é inferior ao R\$ 1.200.000,00 que representa o teto para adesão ao Sistema Integrado de Pagamento de imposto e Contribuições das Microempresas e Empresas de Pequeno Porte (SIMPLES).

O Sistema Integrado de Pagamento de Impostos e Contribuições das Microempresas e Empresas de Pequeno Porte (Simples) é um regime tributário diferenciado, simplificado e favorecido, aplicável às pessoas jurídicas consideradas como Microempresas (ME) e Empresas de Pequeno Porte (EPP), nos termos definidos na Lei nº 9.317, de 1996, e alterações posteriores, estabelecido em cumprimento ao que determina o disposto no art. 179 da Constituição Federal de 1988. Constitui-se em uma forma simplificada e unificada de recolhimento de tributos, por meio da aplicação de percentuais favorecidos e progressivos, incidentes sobre uma única base de cálculo, a receita bruta.

Considera-se ME, para efeito do Simples, a pessoa jurídica que tenha auferido, no ano-calendário, receita bruta igual ou inferior a R\$120.000,00 (cento e vinte mil reais). Considera-se EPP, para efeito do Simples, a pessoa jurídica que tenha auferido, no ano-calendário, receita

bruta superior a R\$120.000,00 (cento e vinte mil reais) e igual ou inferior a R\$1.200.000,00 (um milhão e duzentos mil reais).

Com base nestas considerações, os encargos sociais incidentes na folha de pagamento somam cerca de 23 %. Os custos com pagamentos de pessoal são demonstrados nas tabelas 6.4 e 6.5.

Tabela 6.4 - Folha de pagamento com mão-de-obra

Discriminação	Operários	Encargo social (%)	Salário (R\$/mês)	Folha de pagamento (R\$/ano)
Alimentado linear	1	23	400,00	5.904,00
Desintegrador	1	23	400,00	5.904,00
Misturador	1	23	400,00	5.904,00
Laminador	1	23	400,00	5.904,00
Extrusora	1	23	400,00	5.904,00
Cortador	1	23	400,00	5.904,00
Forno	3	23	400,00	17.712,00
Total	9	-	-	53.136,00

Tabela 6.5 - Folha de pagamento com despesas administrativas

Discriminação	Operários	Encargo social (%)	Salário (R\$/mês)	Folha de pagamento (R\$/ano)
Gerência	1	23	2.500,00	36.900,00
Contador	1	-	3.000,00	3.000,00
Total	2	-	-	39.900,00

Outro gasto operacional é o incidente sobre a matéria-prima e o insumo energético. Neste caso específico propõe-se aproveitar as áreas já degradada pela retirada da argila para implementar uma plantação energética de Capim Elefante. Para efeito de cálculo se considerou que o custo do insumo energético corresponde ao custo de produção do Capim Elefante. Segundo AZEVEDO (2000) este custo de produção é função da quantidade de adubo utilizado e varia entre R\$ 10,00 e R\$ 13,00 por tonelada de matéria seca e posta no campo. No caso de indústrias que não possuem jazida própria, a argila é comercializada a um preço de R\$ 4,25 / m³.

Considerando que para a produção de um milheiro de tijolo são necessários 2 m³ de argila e 0,18 toneladas de Capim Elefante para o processo de queima do milheiro, se calcula que serão necessários 1.296 toneladas de Capim Elefante seco e 14.400 m³ de argila para uma produção bruta anual de 7.200 milheiros de tijolos. A perda media na indústria de cerâmica vermelha é aproximadamente 18 % o que resultará numa produção liquida de 5.904 milheiros de tijolos. Na tabela 6.6 são discriminados os custos em insumo energético e matéria-prima.

Tabela 6.6 - Custos de insumo energético e matéria-prima.

Descriminação	Quantidade anual	Custo unitário	Custo (R\$/ano)
Insumo energético (Capim Elefante)	1.296,00 ton	R\$ 13,00/ton	16.848,00
Matéria-prima (argila)	14.400,00 m ³	R\$ 4,25/m ³	61.200,00
Total	-	-	78.048,00

A fábrica consome nominalmente 432.262,29 kWh, considerando o custo média da tarifa industrial a R\$ 0,32 por kWh, o custo anual com energia elétrica corresponderá a R\$ 139.599,11.

Como pode ser observado na tabela 6.7, estrutura dos custos de produção tijolo tendo como insumo energético o Capim Elefante, o custo unitário de produção corresponde R\$ 45,71 por milheiro. O preço de venda à vista é calculado a partir da seguinte expressão:

$$\text{Preço de venda (PV)} = \frac{\text{Custo unitário do produto}}{(1 - (\text{custo de comercialização em \%} + \text{margem de lucro em \%}))}$$

Desta maneira para um custo de comercialização de 31 % e uma margem de lucro desejado de 36 % o preço de venda à vista do milheiro de tijolo é R\$ 138,53. Preço esse bastante competitivo com os preços de mercado aplicados nas grandes capitais do país e que variam entre R\$ 150,00 a R\$ 200,00, como já descrito anteriormente.

Tabela 6.7 - Estrutura de custos

Investimento fixo	583.547,14
Terreno	45.000,00
Galpão (10% do valor dos equipamentos)	43.863,40
Máquinas e equipamentos	438.634,00
Móveis e utensílios	3.000,00
Veículo	0,00
Eventuais (10% do valor do investimento fixo)	53.049,74
Capital de giro	5.615,72
Caixa mínimo	4.001,68
Matérias-primas, Embalagens e materiais secundários = (Custo anual/360 dias)*dias de estoque	532,49
Financiamento das vendas	0,00
Insumos e serviços básicos	79,46
Mão-de-obra	1.002,09
Investimento Total = Investimento fixo + capital de giro	589.162,86
Custos fixos anuais	140.307,18
Salários + Encargos sociais (mão-de-obra indireta)	36.900,00
Pró-labore	30.000,00
Contabilidade	3.000,00
Depreciação	53.854,71
Aluguéis	0,00
Manutenção	10.965,85
Material de expediente	1.500,00
Outros (3% sobre a soma)	4.086,62
Custos variáveis anuais	525.416,16
Matérias-primas (Argila)	61.200,00
Mão-de-obra direta e encargos	51.536,00
Materiais secundários (água)	2.698,91
Embalagens	0,00
Energia elétrica	139.599,11
Insumos (Capim Elefante)	16.848,00
Impostos	204.463,02
Frete	40.892,60
Comissões sobre vendas	8.178,52
Custos anuais totais = Custos fixos + custos variáveis	665.723,34

Custo unitário do produto	45,71
Custo fixo unitário = Custo fixo / unidades produzidas	23,76
Custo variável direta unitário = (matérias-primas, embalagens, mão-de-obra direta, insumos) / unidades produzidas	21,95
Custo de comercialização (%)	31
Impostos (ICMS) (%)	25
Comissões (%)	1
Expedição (%)	5
Margem de lucro = lucro desejado, (%)	36
Preço de venda (PV) = Custo unitário do produto / (1-(custo de comercialização em % + margem de lucro em %))	138,53
Receitas operacionais = Quantidades de produtos destinados à venda x preço de venda estimado	817.852,06
Lucro operacionais = receitas operacionais - custos anuais totais	152.128,72

Capítulo 7

Conclusões e considerações finais

7.1 - Introdução

A análise de ciclo de vida tem sido desenvolvida para avaliar o desempenho ambiental do processo produtivo de cerâmica estrutural ou vermelha tendo, como insumo energético, o Capim Elefante. A análise inclui uma discussão sobre o potencial da biomassa, a descrição das etapas do ciclo de vida e uma discussão sobre emissões e impactos gerados. A seguir resumos os principais resultados deste estudo.

7.2 - Extração de Argila

A atividade exploratória de argila *in natura* é feita, atualmente, de forma irracional, sem técnicas modernas, desperdiçando-se materiais que se encontram em maiores profundidades, pela ausência de equipamentos adequados e pelo desconhecimento, por parte dos empresários do setor oleiro, de aproveitamento de outras argilas, que não sejam as encontradas superficialmente, a profundidades inferiores a quatro metros. O não aproveitamento de lavra mais profunda faz com que haja sucessivos desmatamentos, tornando a atividade essencialmente de exploração horizontal, aumentando os impactos ambientais decorrentes desta exploração inapropriada.

Os empresários, em sua grande maioria, não tem política estratégica de reaproveitamento das áreas degradadas, deixando-as em situação de abandono, com forte poluição visual,

acelerando os processos erosivos de margens, que culminam com o assoreamento dos cursos d'água e possíveis contaminações de áreas do entorno.

Como o setor cerâmico estrutural é formado por pequenas empresas, seria mais fácil reduzir custos de extração, se fosse feita uma associação ou cooperativa para adquirir estes equipamentos, e houvesse rodízio de sua utilização, entre os vários associados. Entre as alternativas, pode-se empregar:

- i) trator de esteiras, em vez de pá carregadeira, para o corte do material, pela eficiência e força motriz características. A pá carregadeira deve ser utilizada para a carga dos caminhões basculantes. Neste caso, pode-se prever uma rampa para descida e subida dos equipamentos envolvidos na extração (trator, pá carregadeira e caminhões basculantes);
- ii) utilização de trator de esteiras para o corte de argila, mas com transporte deste material através de correias transportadoras, até o topo do terreno. Este processo dispensa a descida da pá carregadeira e dos caminhões ao mesmo nível de corte do material, diminuindo tempo de carga, de transporte e reduzindo, assim, o uso da força motriz máxima dos equipamentos carregados, nas rampas (estas nem sempre contam com inclinações suaves);
- iii) utilização de retroescavadeiras com lança de longo alcance, para permitir a escavação em níveis mais profundos, não necessitando, assim, a descida de outros equipamentos ao nível de corte do terreno.

7.3 - Transporte

No que diz respeito ao abastecimento de matéria prima e insumo energético à indústria, o primeiro requisito é de que o local de produção esteja o mais próximo possível do local de fornecimento (extração de argila e produção da biomassa). O sistema de transporte para estes materiais deve, dessa forma, gerar o menor impacto ambiental possível, nos casos em que a distância for grande, deve-se optar por sistemas menos impactantes. O sistema de transporte (caminhão) e de transferência (correias), devem ser fechados.

Com relação ao tipo, composição e características das matérias primas, o critério a ser adotado deve levar em conta a menor toxicidade e o baixo conteúdo de substâncias poluentes, desde que, não deixe de atender às exigências tecnológicas e produtivas.

7.4 - Produção do Capim Elefante

A produção do Capim Elefante não apresenta obstáculo tecnológico significantes. Salvo mudanças radicais, por exemplo, através de doses excessivas de fertilizantes, visando-se maiores produtividades, a análise ambiental da biomassa não deve apresentar grandes impactos. O balanço energético de 1 ha de capim tem-se mostrado altamente positivo. A etapa que corresponde à produção do capim requer o menor consumo de energia, da ordem de 1,21 % contra 18,63 %, 29,27 % e 50,89 % respectivamente para as etapas de transporte, extração de argila e queima dos produtos cerâmicos. O custo de produção variando de R\$ 10,00 a R\$ 13,00 a tonelada de matéria seca mostra exista boas chances de o capim elefante, quando cultivado sustentavelmente, competir com as demais biomassas utilizadas atualmente na indústria de cerâmica. Entretanto, diante do atual estágio de desenvolvimento da produção do capim elefante e também dos sistemas de alimentação que sendo usados em quase totalidade das olarias, ainda existem inúmeros aspectos a serem melhor investigados.

A introdução do capim elefante como insumo energético na indústria de cerâmica estrutural além de aliviar as pressões sobre o ecossistema comparada com as grandes quantidades de lenha que este segmento da indústria demanda pode também ser utilizado para o reaproveitamento de áreas degradadas.

7.5 - Produção e queima dos tijolos

O sistema de produção deve ser projetado, executado e gerido de modo a prevenir a dispersão de poluentes na atmosfera. Os fornos de queima devem ser projetados e executados visando o mínimo consumo de combustível, e conseqüentemente a mínima emissão de produtos da combustão.

Embora o ciclo tecnológico de produção tenha como objetivo atender à competitividade da empresa e do produto, em razão das exigências do mercado, a proteção do meio ambiente seja por exigência do mercado ou pela legislação, motiva inovações tecnológicas cada vez mais. Enquanto estas inovações não vierem, faz-se necessário investimento em sistemas de proteção e de redução das emissões.

7.6 – Análise econômica

Do ponto de vista econômico, no tocante à preço de venda do milheiro de tijolo produzido em um processo onde o insumo alternativo é utilizado, conclui-se pela competitividade. O preço de venda calculado R\$ 138,53 é bem menor ao valor de R\$ 150,00 a R\$ 200,00 de mercado, ainda se deve considerar que, nos processos atuais de produção de tijolos, na maioria das vezes, no preço do insumo energético (lenha) não está inclui as taxa e impostos legais. Isso devido ao fato de que a lenha é retirada em matas nativas e de forma ilegal.

Referências Bibliográficas

- Azapagic, A. Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimization. *Chemical Engineering Journal*, n. 73, pp. 1-21, 1999.
- Azapagic, A. & Clift, R. The application of life cycle assessment to process optimization. *Computers and Chemical Engineering*, n. 23, pp. 1509-1526, 1999.
- Azevedo P. B. M., *Aspectos econômicos da produção agrícola do capim elefante*, Agrener 2000, Anais.
- Bauen, A.; Kaltschmitt, M. (199b), Current use and potential of biomass for energy in developing countries and implications for CO₂ emissions.
- Bauen, A. (1999), *Gaseification-based Biomass Fuel Cycles: An Economic and Environmental Analysis at the Regional level*. King's College London, University of London, Nov. 1999, 297 p. A report submitted for the degree of Doctor of Philosophy.
- Bauen, A.; Kaltschmitt, M. (1999a), Contribution of biomass toward CO₂ reduction in Europe (EU), In Overend, R. et al. (eds), Biomass: A Growth Opportunity in Green Energy and Value-Added Products, *Proceedings of the 4th Biomass Conference of the Americas*, August 29 – September 2, Oakland CA.

- Betes, L., 1994. The Storage, feed and collection of loose solids. Powder Handling and Processing, vol. 6, n.2.
- Böhm, E.; Walz, R. Life Cycle Analysis: A Methodology to Analyse Ecological Consequences within a technology Assessment Study? *International Journal of technology Management*. Vol.11. n.5/6. Inderscience Enterprises Ltd. 1996. Pp. 554-565.
- Burgess, A. A. & Brennam, D. J. Application of life cycle assessment to chemical processes. *Chemical Engineering Science*, n. 56, pp. 2589-2604, 2001.
- Busani, G. Palmonari, C. Timellini, G. *Piastrelle Ceramiche & Ambiente*. Sassuolo. 1995. EdiCer S.p.a. in
- Christiansein, K. Possibilities and limitations to life cycle analysis. In: Patrick R., Analyse du Cycle de vie – Évaluation des impacts. Laboratoire d'évaluation environnementale des Procédés et des Systemes Industriels. Institut National des Sciences Appliqués de Lyon.
- Consoli, F., Boustead, I., Fava, J., Franklin, W., Jensen A., de Oude, N., Parish, R., Postlethwaite, D., Quay, B., seguin, J., & Vignon, B.(1993). *Guidelines for life-cycle assessment: A 'Code of Praticce'*. SETAC.
- Cortez, L. A. B. e Lora, E. S.; *Tecnologia de Conversão Energética da Biomassa – Serie: Sistemas Energéticos*, v.2..Manaus: EDUA/EFEI, 1997.
- Curran, M.A. *Environmental life-cycle assessment*. McGraw-Hill (1996).
- Eichner, M.J. Nitrous oxide emissions from fertilized soil. In: Martin C.H.; Gregory, A.K.; Timothy, A.V. *Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system*. Biomass & Bioenergy, accepted 4 Dec. 2002 –Article in Press.

- Ferreira, M. S. *Telha Cerâmica: Identificação do Sistema de Produção e Estudo de Alternativa Industrializável por Extrusão*. Universidade federal de santa Catarina, 1992 Dissertação de Mestrado.
- Ferrão, P.C. (1998), “*Introdução à Gestão Ambiental – a avaliação do ciclo de vida dos produtos*”. Coleção Ensino da Ciência e da Tecnologia, IST Press, Lisboa.
- Forsberg, G. *Biomass energy transporte. Analysis of bioenergy transport chains using life cycle inventory method*. Biomass and Bioenergy, n. 19, pp. 17-30, 2000.
- Guinée. J. B., e al., *Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards*. Final report. Centre of Environmental Science – Leiden University (CML). May 2001.
- Hall D. O.; House, J. (1995), *Biomass – A modern and environmentally acceptable fuel*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 38 (1-4), 521-542.
- Hall, D.O.; House, J.; Scrase, I. (1999), *An Overview of Biomass*, in Rosillo-Calle F.; Rothman, H.; Bajay, S.V. (eds). *Industrial Uses of Biomass Energy: The Example of Brazil*, Taylor&Francis, London.
- Harrison, R.; Webb, J. A review of the effect of N fertilizer type on gaseous emissions. In: Sparks DL, editor. *Advances in agronomy*, vol. 73. New York: Academic Press, 2001 p. 66-108.
- Helen, L. Data quality for Life Cycle Assessment. *Address to National Conference on Life Cycle Assessment: Shaping Australia’s Environmental Future*, Melbourne, February 29 – March 1, 1996.
- Heijungs, R.; Guinée, J.; Huppes, J.; Lankreijer, R.M.; Udo de Haes, H.A.; Sleewijk, A.W. *Environmental Life Cycle Assessment Of Products – Backgrounds*. CML. Leiden University. The Netherlands. Oct. 1992.

Huppes, G. (1996). LCA yesterday, today and tomorrow. Centre of environmental science: Leiden University.

IPCC – International Panel on Climate change. Revised 1966, IPCC *Guindelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 1997.

Jaques, A.V.A *Fisiologia do crescimento do capim-elefante*. In: Carvalho, I. de A., Carvalho, M.M., Martins, C.E., Vilela, D. eds. Simpósio sobre capim-elefante. Coronel Pacheco: EMBRAPA-CNPGL, 1990, 195p.

Janssen, H.A. Verusche ubre Getreidedruck in Silozollen (On the Measurement of Pressures in Grain Silos); Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, p. 1045-1049, 1895. apud Roberts, A. W., 100 years of Janssen, Bulk Solid Handling, v.15, n.3, p.369-383.

Jenkins, B. M.; Baxter, L. L.; Miles Jr., T. R.; Miles, T. R. *Combustion properties of biomass*, Fuel Processing Technology 54 (1998) 17-46.

Jenike, A. W. Storage and Flow of Solids – Bulletin 123, University of Utah Engineering Experimentation Station, Salt Lake City, Nov. 1964, apud Marinelli, J., Carson, J.W., *Solve Solids Flows Problems in Bins, Hoopers, and Feeders*. Chem. Eng. Progress, p.22-28, May 1992.

Jenike and Janson, inc. *Patent Awarder for Feeding Screw on* “Flow od Solids Newsletter”, v.XII,n.1,p.2, Fev.1992.

Johansson, T. B. Et al., *Sources for fuels and electricity*. Renewable Energy. Island Press, 1993, Chapter 14, Biomass for Energy. In: Colelho, S. T. et al, *Medidas Mitigadoras para a redução de emissões de gases de efeito estufa na geração Termelétrica*. Brasília. Dupligráfica, 2000. 222p.

Leal, R. M. e Macedo, I. C.(2003), “*Life Cycle Analysis of Energy Use in Sugar/Ethanol Production*”, ISSCT Workshop, Piracicaba, SP

- Kanury, A.M., *Combustion Characteristics of biomass fuels*, *Combustion Sci. Technol.* 97(1994) 469-491 in Jenkins, B.M.; Baxter, T.R.; Miles Jr, T.R. Miles, T.R. *Combustion properties of biomass*, Fuel Processing Technology 54 (1998) 17-46.
- Klass, D.L. (1995), Fuels from biomass, in Bisio A. And Boots S. (eds), Encyclopedia of Energy Technology and the Environment, vol.2, John Wiley & Sons, New York
- Miettinen, P., & Hamalainen, R. P. (1997). *How to benefit from decision analysis in environmental life cycle assessment (LCA)*. European Journal of Operational Research, 102, 279-294.
- Mohin, T.J. (1994). In B. Taylor et al (Eds.) *The environmental management handbook*. London, Great Britain: Pitman Publishing.
- Motta, J.F.M.; Junior, M.C; Tanno, L.C. As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: *O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos*. *Cerâmica Industrial*, v.6, n.2, p.28-39, mar/abr.2001.
- National Atmospheric Deposition Program. NADP/NTN Monitoring Location
<http://nadp.sws.uiuc.edu/nadpdada/>
- Neiva, B. A. C. *Estudo da alimentação de bagaço de cana em reatores atmosféricos*. Universidade Estadual de Campinas – FEM / UNICAMP, 1998, Dissertação de mestrado.
- Nogueira, L. A. H.; Lora, E. S; Trassero, M. A.; Frisk, T. *Dendroenergia: Fundamentos e aplicações*. – Brasília: ANEEL, 2000
- Olivares, G.E. *Projeto, Construção e Avaliação Preliminar de um reator de leito fluidizado para gaseificação de bagaço de cana-de-açúcar*. Universidade estadual de Campinas FEAGRI - UNICAMP, 1996 Dissertação de Mestrado.

Oliveira, A.P.N. *Tecnologia de fabricação de revestimentos Cerâmicos*. Cerâmica Industrial, v.5, n.6, p.37-47, nov./dez.2000.

Pinheiro, P. C. C.; Sampaio, R. Rezende, M. E. A., *Fundamentos e Práticas da carbonização da Biomassa*, Belo Horizonte: edição dos autores, 2001

Polo Produção Ltda. *Anuário Brasileiro da cerâmica Vermelha*. Pólo Produção Ltda. Santa Catarina, 2000.

Ponte Filho, F., *Gaseificadores de Leito Fixo, Análise e Modelo para Otimização de Projetos e Pesquisas*, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, 1988 (Doutorado)

Rosa, Luiz Pinguelli. et al. *Contribuições históricas por países nas emissões de três gases de efeito estufa (GEE)-Relatório Preliminar ao MCT*. Outubro 2001. pág 15 e 16.
Disponível em: <www.mct.gov.br/clima/brasil/ação08.htm> Acesso em: 09/03/2003.

Udo de Haes, H. A. (1993). *Applications of life cycle assessment: Expectations, drawbacks and perspectives*. Journal of Cleaner Production, 1(3-4), 131-137.

Udo de Haes, H. A. (1996). *Towards a methodology for life cycle impact assessment*. Europe Workgroup on Life Cycle Impact Assessment, February.

Ugaya, C.M.L. *Análise de ciclo de vida: estudo de caso para materiais e componentes automotivos no Brasil*. Universidade estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica 2001, 199p. Tese de Doutorado.

UNEP – United Nations Environment Programme (1996). *Life cycle assessment: What it is and how to do it*. Paris, France.

Santos, P. S. *Tecnologia das argilas, aplicada às argilas brasileiras*. São Paulo. Edgar Blücher, Ed. Da Universidade de São Paulo, 1975, 2º v. 802p.

Schultz, S.C.; Kitto, J.B (1992) *Steam its Generation and Use*, Babcock & Wilcox, Barberton. In *Life cycle Assessment of a Biomass Gaseification Combined-Cycle System*. National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-430-23076

Seye, O et al. *Estudo cinético da biomassa a partir de resultados termogravimétricos*, Agrener 2000 Anais.

Vasconcellos, M. A. S.; Garcia, M. E. *Fundamentos de economia*, São Paulo, Editora Saraiva, (2001).

Villar, V. S. *Perfil e perspectivas da indústria de cerâmica vermelha no sul de Santa Catarina*. Universidade Federal de Santa Catarina, 1988, Dissertação de Mestrado.

WICE (World Industry Council for the Environment). *Life Cycle Assessment: an environmental management tool*. Report. Oct. 1994. 16p.

Anexo

Estudo cinético da biomassa a partir de resultados termogravimétricos

Omar Seye, Luís Augusto Borbosa Cortez
Área Interdisciplinar de Planejamento de Sistemas Energéticos - Faculdade de Engenharia
Mecânica, Universidade Estadual de Campinas
Cidade Universitária Zeferino Vaz
13083-970 Campinas/SP Fone: (19) 788-72 42 Fax: (19) 289-4717

Edgardo Olivares Gómez
Faculdade de Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas
Cidade Universitária Zeferino Vaz
13083-970 Campinas/SP Fone: (19) 788-7242 Fax: (19) 788-1010

RESUMO

A maior ênfase dada à utilização de combustíveis provenientes da biomassa, por motivos ambientais (conversão de biomassa em produtos energéticos com aceitáveis impactos ambientais) ou econômicos (alternativas aos combustíveis fósseis), exige um maior conhecimento dos parâmetros cinéticos envolvidos nas reações de termo conversão.

O estudo termogravimétrico de quatro tipos de biomassa (Bagaço e Palha de Cana-de-Açúcar, Resíduos de Madeira e Capim Elefante (*Pennisetum purpureum Schum*) foi realizado em duas atmosferas (Ar e Argônio) e com três taxas de aquecimento diferentes (20, 60 e 100 K/min). Os resultados obtidos demonstram como o comportamento da decomposição e seus parâmetros cinéticos são influenciados pela espécie ou tipo de biomassa e pela taxa de aquecimento do processo.

ABSTRACT

A current interest associated with the use of biomass fuel for reason environmental or economic requires knowledge of the kinetics and mechanisms of biomass combustion.

A thermogravimetric study of the pyrolysis of four different types biomass (bagasse, cane trash, wastes wood and switchgrass - *Pennisetum Purpureum Schum*) is carried out in both oxidizing and inert atmospheres (air and argon) and with three heating rates (20, 60 and 100 K/min). The obtained results revealed that the chemical composition (type of biomass) and the heating rates play a fundamental role in the kinetics behavior of their thermal decomposition.

INTRODUÇÃO

A biomassa é a fonte de 14% da energia utilizada no mundo (35% da energia nos países em desenvolvimento). A evolução dos processos de conversão tradicionais para sistemas altamente eficientes, levando a vetores energéticos, como o carvão vegetal, utilizado como combustível doméstico ou agente redutor na indústria siderúrgica, ou como carvão aditivado, material com propriedades adsorptivas, usado para a separação de compostos indesejáveis, purificação e remoção de poluentes líquidos e gases, combustíveis gasosos ou insumos químicos, trará uma mudança importante no perfil de utilização e nos volumes de biomassa utilizados para a produção de energia nos próximos anos.

Uma avaliação comparativa entre diferentes biomassas permitirá a escolha daquela que apresente maiores potencialidades como insumo. Sendo fundamental o conhecimento do comportamento térmico e dos parâmetros cinéticos da biomassa durante o processo de termo conversão. As técnicas de análises térmicas, em particular a Análise Termogravimétrica (TG) e a Análise Termogravimétrica Derivada (DTG), permitem a obtenção de tais informações de maneira simples e rápida.

O presente trabalho foi conduzido no sentido de:

- Caracterizar amostras de quatro tipos de biomassa;
- Realizar as Análises Térmicas em atmosfera oxidante e inerte, seguida das análises comparativas das curvas de TG e DTG;
- Obtenção dos parâmetros cinéticos necessários para a modelagem do processo de termo conversão;

MATERIAS E MÉTODOS

Tipos de Biomassa utilizadas

Os materiais lignocelulósicos analisados são o Bagaço de Cana-de-Açúcar, a Palha de Cana-de-Açúcar, Resíduos de Madeira e Capim Elefante (*Pennisetum purpureum Schum*). As biomassas foram inicialmente peneiradas e para este estudo escolheu-se três faixas de granulométrica: $dp < 0,15$ mm; $0,60 < dp < 0,84$ mm e $1,19 < dp < 2,38$ mm.

Métodos descritos pelas normas ASTM E871-82, E872-82 e E1534-93 foram usados para a realização da análise imediata. A composição elementar (teor em peso de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio) de uma amostra de fina granulométrica foi obtida por meio de um analisador elementar CHN 2400 Perkin Elmer. Na tabela 1 estão reportadas os resultados de estas análises.

Análise Termogravimétrica

As perdas de massa dos diferentes materiais lignocelulósicos foram medidas em atmosfera inerte (argônio) e oxidante (ar) fazendo-se uso de uma termo balança Mettler TA4000 System. Os ensaios foram realizados com temperaturas variando na faixa de 25 até 650°C, taxas de aquecimentos de 20, 60 e 100 K/min, vazão do gás (ar puro ou argônio) de 100 mL/min, massa inicial da amostra de aproximadamente 5 mg. Optou-se por realizar o processo a baixas taxas de aquecimento, de maneira a definir bem as etapas através das quais transcorre o processo, além do que, com baixas taxas de aquecimento minimiza-se a diferença entre a temperatura do sólido e a temperatura medida pelo sistema termogravimétrico [1,2], garantindo-se assim uma maior homogeneidade entre a temperatura da amostra e a temperatura no ambiente da termo balança.

Parâmetros Cinéticos

É amplamente conhecida a utilização de técnicas termo analíticas para a determinação das etapas e os correspondentes valores dos parâmetros cinéticos, que caracterizam os processos que regem a decomposição térmica dos materiais orgânicos.

O procedimento matemático utilizado neste trabalho para analisar os dados termogravimétricos e determinar os parâmetros cinéticos, segue o método integral reportado por vários autores [1-4]. A taxa de conversão é dada pela expressão:

$$\frac{d\alpha}{dt} = kf(\alpha) \quad (1)$$

Onde:

k , uma constante cinética específica, é dada pela expressão de Arrhenius:

$$k = Z \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2)$$

Onde:

Z = fator pré-exponencial (s^{-1}), E = energia de ativação (kJ/mol), R = constante dos gases (kJ/mol K), e T = temperatura (K).

α é a fração pirolisada, a qual pode ser determinada para diferentes temperaturas, e é definida como:

$$\alpha = \frac{W_0 - W_t}{W_0 - W_f} \quad (3)$$

Onde:

W_0 = massa inicial da amostra (mg),

W_t = massa da amostra no tempo t (mg),

W_f = massa da amostra após a completa decomposição da biomassa (mg).

A figura 1 mostra os valores de α obtidos para os quatros tipos de biomassa em função da temperatura e para uma taxa de aquecimento de 20 K/min.

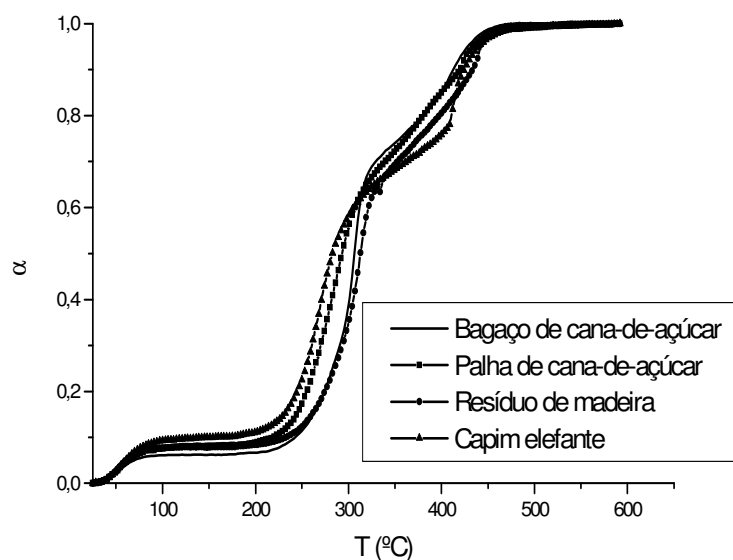


Figura 1 - Valores de α para várias temperaturas e taxa de aquecimento de 20 K/min

Tabela 1 Características das biomassas utilizadas como matéria-prima

	Análise Imediata (%)				Análise Elementar (%)			
	Umidade	Carbono fixo	Materiais Voláteis	Cinzas	C	H	N	O*
Bagaço de Cana	10,51	16,10	69,39	4,0	46,73	5,9	0,87	46,5
Palha de Cana	10,25	16,35	66,40	7,0	43,42	5,71	1,23	49,64
Resíduo de Madeira	10,40	16,25	69,10	4,25	48,06	6,03	0,70	45,21
Capim Elefante	10,39	16,41	61,86	11,34	40,95	5,59	1,70	51,76

- Obtido por diferença

Devido à complexidade dos materiais lignocelulósicos (mistura de celulose, hemicelulose e lignina), onde ainda, cada fração pode ser considerada como uma mistura de biopolímeros, vários modelos de reações tem sido propostos: reações em série, reações consecutivas e mistura dos dois [5]. Contudo, o modelo de decomposição térmica com dois ou três zonas de reações de primeiro ordem, com diferentes parâmetros cinéticos, tem sido dos mais considerados. A estratégia analítica é fundamentada no fato de que as três famílias de polímeros que principalmente compõem a biomassa, têm distintas taxas de temperaturas de decomposição [6]. A hemicelulose é menos resistente à degradação térmica, seguida pela celulose e lignina. A hemicelulose e a celulose decompõem na faixa de temperatura inferior a 330°C, dependendo da natureza dos heteropolímeros presentes na biomassa e das condições experimentais. Já a lignina inicia a sua decomposição a temperaturas acima de 300°C.

De acordo com o modelo proposto (dois intervalos de temperatura, no qual em cada um ocorre a decomposição de um particular componente da biomassa) e assumindo estas reações

como sendo de primeiro ordem, $f(\alpha) = (1 - \alpha)$. Linearizando a equação (1) com as condições iniciais: $t = t_i$ e $\alpha = \alpha_i$, temos:

$$-\ln(1 - \alpha) + \ln(1 - \alpha_i) = k(t - t_i) \quad (4)$$

Valores experimentais de k podem ser obtidos plotando $\ln(1 - \alpha)$ versus t .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise Imediata e Elementar

As diferenças observadas nas análises imediata e elementar (Tabela 1), originaram diferenças na evolução da fração pirolisada, α com a temperatura (Figura 1). À temperatura inferior a 300 °C, os valores de α são maiores para o Capim Elefante e a Palha de Cana-de-Açúcar. Este fato deve estar ligado a um maior teor de hemicelulose nestas espécies de biomassa (que se decompõe nesta faixa de temperatura). Inversamente, a taxa de decomposição destes mesmos materiais é menor acima desta temperatura. Isto pode ser justificado pelo alto teor de cinza e de carbono fixo em relação ao do Bagaço da Cana-de-Açúcar e do Resíduo de Madeira, também pela provável diferença na natureza da lignina que os compõem.

Análise Térmica

Atmosfera de ar: As curvas termogravimétricas das amostras de biomassa podem ser vistas nas Figuras 2 e 3, onde a percentagem da perda de massa em relação à massa inicial, reportada no eixo das ordenadas foi normalizada para facilitar a comparação entre espécies.

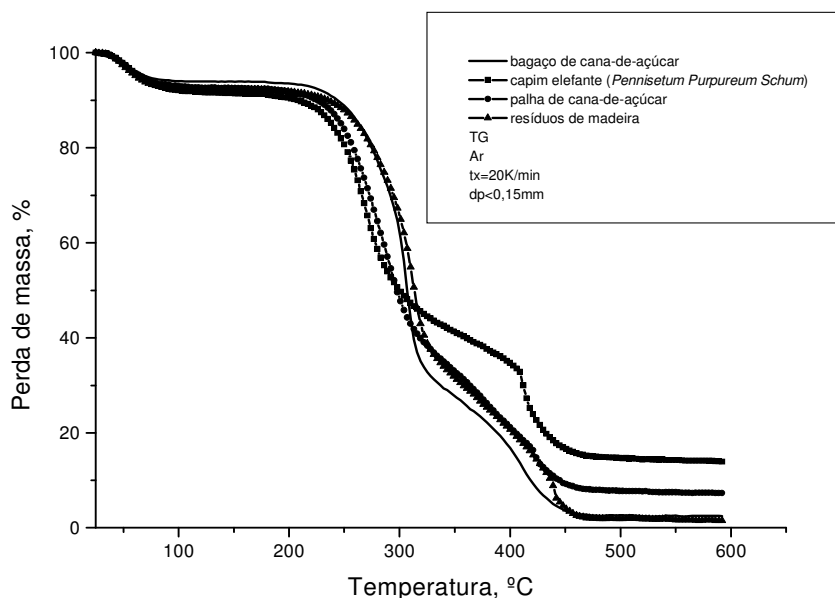


Figura 2 - TG das biomassas em ar

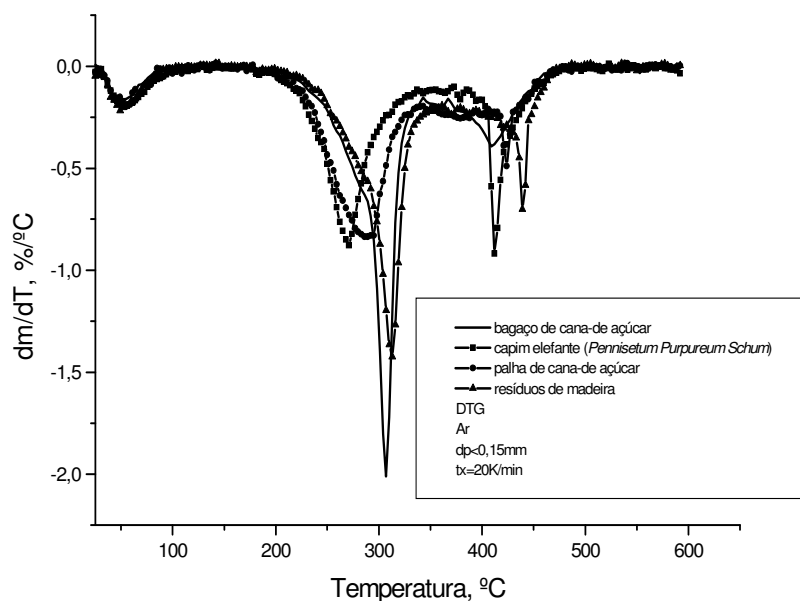


Figura 3 - DTG das biomassas em ar

Três zonas de perda de massa podem ser observadas: a primeira, ~100°C é devida à evaporação da água, enquanto que a segunda (200-350°C) e a terceira (350-500°C) são devidas ao processo de conversão. A amplitude da perda de massa nestas duas etapas do processo de conversão difere de uma espécie de biomassa para outra. Em geral, na segunda etapa do processo a taxa de perda de massa é menor para as espécies com alto teor de lignina, o que sugere uma correlação entre a amplitude da curva com o teor de lignina [7].

Na figura 3, obtida por diferenciação da curva de perda de massa, as duas etapas do processo de conversão são bem nítidas, e os picos diferem em posição e amplitude. O segundo pico do processo oferece informações acerca dos teores de lignina presente nas espécies estudadas. O teor de lignina é um parâmetro importante quando se visa a produção de carvão vegetal. Uma biomassa com alto teor de lignina oferecerá um maior rendimento de carvão vegetal (charcoal) durante o processo de pirólise. Portanto, as espécies estudadas podem ser classificadas em ordem decrescente de acordo com seus teores de lignina: Capim Elefante, Resíduos de Madeira, Palha de cana-de-açúcar e o Bagaço de cana-de-açúcar. Note-se que é preciso levar em consideração o teor de cinza presente nas espécies (maior para o Capim elefante, 11,34% e menor para o bagaço de cana-de-açúcar, 4,0%). Num estudo recente [8], reporta-se que as cinzas presentes nas biomassas são também função de seus teores de lignina.

Termogravimetria em atmosfera inerte: Nas curvas obtidas em atmosfera de argônio, (Figuras 4 e 5), o processo de devolatilização inicia-se em torno de 200°C, e a máxima taxa de perda de massa ocorre na faixa de temperatura de 330 a 370°C para todas as amostras. Uma estimativa da perda de massa das amostras entre 120°C, o fim da evaporação da umidade, e 450°C, temperatura indicada na literatura como ideal para a produção de carvão vegetal (pirólise lenta), indica uma perda de mais de 70% para o Bagaço de Cana-de-Açúcar e o Resíduo de

Madeira, 60% para a Palha de Cana-de-Açúcar e somente 55% para o Capim Elefante. Isto demonstra a potencialidade do Capim Elefante de oferecer maior quantidade de resíduo sólido (carbono fixo + cinzas).

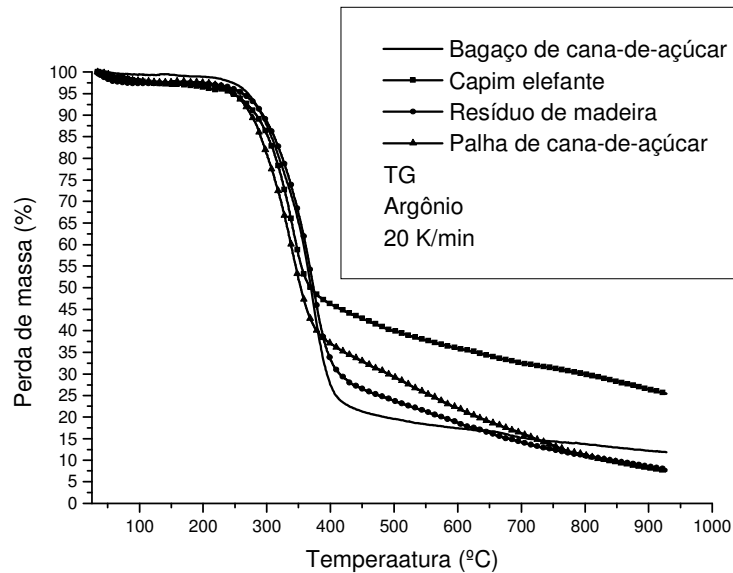


Figura 4 - TG das biomassas em atmosfera inerte

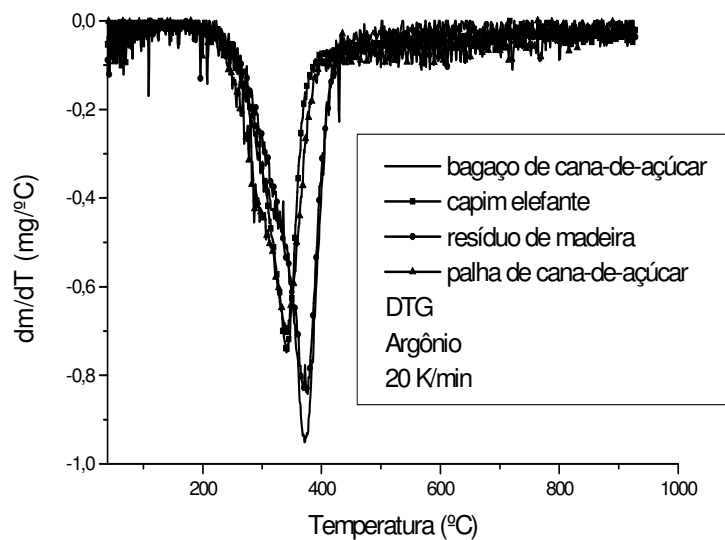


Figura 5 - DTG das biomassas em atmosfera inerte

Parâmetros Cinéticos

Quando a biomassa é utilizada como insumo em plantas de pirólise rápida para a obtenção de bio-óleo ou gás, e em plantas de pirólise lenta para a obtenção de carvão vegetal, é necessário

conhecer as propriedades que influenciam no seu comportamento em atmosfera inerte ou oxidante. Estes parâmetros foram estudados em atmosfera de ar e são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Influência da taxa de aquecimento nos parâmetros cinéticos em atmosfera de ar

T(°C)	α	K (s ⁻¹)	E (kJ/mol)	Z (s ⁻¹)
Capim elefante dp < 0,15 mm				
taxa = 20 K/min				
268	0,367	6,29E-04	72,507	6,39E-04
415	0,844	1,59E-03	125,333	1,63E-03
taxa = 60 K/min				
265	0,387	2,04E-03	68,625	2,07E-03
397	0,755	3,78E-03	31,582	3,81E-03
taxa = 100 K/min				
245	0,381	3,64E-03	82,664	3,71E-03
361	0,72	6,30E-03	22,596	6,33E-03
Palha de cana dp < 0,15 mm				
taxa = 20 K/min				
286	0,436	7,32E-04	62,494	7,41E-04
424	0,919	2,11E-03	97,261	2,14E-03
taxa = 60 K/min				
274	0,425	7,49E-04	83,378	7,63E-04
382	0,837	1,71E-03	39,608	1,72E-03
taxa = 100 K/min				
255	0,426	4,03E-03	52,48	4,08E-03
368	0,796	7,72E-03	13,438	7,74E-03
Resíduo de madeira dp < 0,15 mm				
taxa = 20 K/min				
310	0,458	7,17E-04	138,96	7,38E-04
436	0,909	1,94E-03	144,16	1,99E-03
taxa = 60 K/min				
304	0,472	2,10E-03	95,707	2,14E-03
418	0,881	5,10E-03	51,335	5,15E-03
taxa = 100 K/min				
291	0,465	3,92E-03	68,272	3,98E-03
431	0,89	9,07E-03	28,424	9,11E-03
Bagaço de cana dp < 0,15 mm				
taxa = 20 K/min				
307	0,512	8,50E-04	147,38	8,76E-04
412	0,897	1,96E-03	55,46	1,98E-03
taxa = 60 K/min				
304	0,498	2,48E-03	138,625	2,55E-03
421	0,952	7,69E-03	41,543	7,74E-03
taxa = 100 K/min				
288	0,513	4,57E-03	89,698	4,65E-03
411	0,908	1,03E-02	22,848	1,03E-02

São duas as expressões cinéticas para cada taxa de aquecimento, representando os picos nos dois estágios da decomposição durante o processo de pirólise dos quatro espécies de biomassa estudadas. A influência da taxa de aquecimento sobre a energia de ativação (inversamente proporcional) é clara: quanto maior a taxa de aquecimento menor é a energia de ativação. Isto deve ser atribuído a maiores taxas de transferência de calor. No primeiro estágio, as reações transcorrem a temperaturas relativamente baixas e com energia de ativação na faixa de 52-83, 68-80, 68-138 e 89-147 kJ mol⁻¹, para Palha de Cana, Capim Elefante, Resíduo de Madeira e Bagaço de Cana respectivamente. No segundo estágio, as reações apresentam menores valores da energia de ativação, e numa faixa muito mais ampla (13-144 kJ mol⁻¹).

Pode-se notar contudo uma diferença substancial entre os valores obtidos e aqueles reportados na literatura para materiais lignocelulósicos [9,10,11]. Estas diferenças entre os resultados podem ser devido a: variações entre os métodos experimentais, entre as condições operacionais e na composição química de cada matéria-prima usada. Reina et al.[9], fazendo uso do modelo cinético de duas reações independentes, e pirolisando três tipos de Resíduos de Madeira encontraram valores de 72,8, 80,7 e 103,2 kJ/mol. Örfao et al.[10] usaram o mesmo tipo de modelo para descrever a pirólise da hemicelulose presente em casca de amêndoa, e chegaram a valores de 98,3 kJ/mol para a energia de ativação na decomposição da hemicelulose e citaram valores de 36,7 kJ/mol para a pirólise da lignina, valor obtido e reportado por Cordero et al.[11].

Comportamentos similares são observados no estudo da energia de ativação em relação à granulometria da biomassa. A Tabela 3 mostra os valores dos parâmetros cinéticos obtidos para a conversão térmica do Bagaço de Cana-de-Açúcar em atmosfera oxidante e com taxa de aquecimento de 20 K/min. Pode-se observar que existe uma tendência ao aumento da energia de ativação com o diâmetro médio de partícula do Bagaço de Cana (dado pela sua classe de tamanho), em cada zona de reações.

Tabela 3 Influência da granulometria nos parâmetros cinéticos

dp (mm)	T (°C)	k * 10 ⁻³ (s ⁻¹)	E (kJ/mol)
dp < 0,15	307	0,84	147,3
	412	1,96	55,4
0,60 < dp < 0,84	310	0,72	145,7
	433	1,86	80,1
1,19 < dp < 1,68	313	0,82	167,1
	421	1,77	100,3

Este comportamento era esperado, pois a energia de ativação é influenciada pela taxa de transferência de calor que, por sua vez, é influenciada pela classe de tamanho de partículas dominante. Quanto menor é a classe de tamanhos das partículas dominantes, mais rápido acontece o aquecimento das mesmas (maior a taxa de transferência de calor) e menor a energia de ativação.

CONCLUSÃO

A análise térmica é uma boa ferramenta para investigar biomassas e seu comportamento durante os processos de termoconversão em atmosfera inerte ou oxidante. O método termogravimétrico pode ser utilizado para estimar o teor de lignina presente na biomassa. Biomassas com baixo teor de lignina podem ser consideradas ótimas matérias-primas para a produção de bio-óleo, enquanto que uma biomassa com alto teor de lignina pode vir a fornecer um maior rendimento de carvão vegetal. As curvas termogravimétricas têm mostrado que, quando se visa à obtenção de carvão vegetal, o processo de pirólise não deve ser conduzido acima de 450°C.

PALAVRAS CHAVES

Biomassa, Parâmetros cinéticos, Análise Termogravimétrica, Pirólise

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem à FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos, através do Projeto Integrado de Biomassa - PIB (projeto FINEP 113/97), e à Professora Dra. Maria Irene Yoshida do Departamento de Química - ICEx/UFMG - Belo Horizonte - MG.

REFERÊNCIAS

- 1 Bilbao, R.; Arauzo J. e Millera. A. **Kinetics of Thermal Decomposition of Cellulose. Part I. Influence of Experimental Conditions.** Thermochimica Acta, nº 120, pp.121-131, (1987).
- 2 Bilbao, R.; Arauzo J.e Millera. A. **Kinetics of Thermal Decomposition of Cellulose. Part II. Temperature Differences Between Gas and Solid at High Heating Rates.** Thermochimica Acta, nº 120, pp.133-141, (1987).
- 3 Antal, M.; Friedman, H.; Roger, F. Sci. Technol. v.21, p. 141, (1980).
- 4 Bilbao, R.; Millera. A. e Arauzo J. Thermochimica Acta, nº 143, p137, (1989).
- 5 Font, R; Williams, P. T. **Pyrolysis of biomass with constant heating rate: influence of the operating conditions.** Thermochimica Acta nº250 p.109-123, (1995).
- 6 Akita, K. **Report of Fire Research Institute of Japan**, v.9, nº 1-2, p.1-44, 51-54, 77-83, 196. Citado por Güell, ^a J., Guzman, J. A. **Geral heat and mass transfer analysis of wood carbonization.** Latin american Applied Research, v.23, p.221-230, (1993).
- 7 Ghetti, P.; Ricca, L.; Angelini, L. **Thermal analysis of biomass and corresponding pyrolysis products.** Fuel v.75, nº 5, pp.565-573, (1996).
- 8 Raveendran, K.; Ganesh, A; Khilar, C. **Pyrolysis characteristics of biomass and biomass components.** Fuel, v. 75, nº 8, p.987-998, (1996).

9 Reina, J.; Velo, E.; Puigjaner, L. **Thermogravimetric study of the pyrolysis of waste wood.** *Thermochimica acta*, nº 320, p161-167, (1998).

10 Órfão, J.J.M; Antunes, F.J.A; Figueiredo, J.L. **Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials - Three independent reactions model.** *Fuel* nº 78, p.349-358, (1999).

11 Cordero, T.; Rodríguez-Maroto, J; Rodríguez-Mirasol; Rodríguez, J.J. **On the kinetics of thermal decomposition of wood and wood components.** *Thermochimica acta* nº 164, p. 135-144, (1990).

12 García, A. N.; Marcilla, A.; Font, R. **Thermogravimetric kinetic study of the pyrolysis of municipal solid waste.** *Thermochimica acta* nº254, p.277-304, (1995).