

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR-MG**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**  
**FERNANDA MARA DA SILVEIRA**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO EMPREGO DA MOINHA DE  
CARVÃO VEGETAL, DO COQUE VERDE DE PETRÓLEO E DA CASCA DE CAFÉ  
COMO COMBUSTÍVEL EM FORNOS DE CAL**

**FORMIGA – MG**  
**2012**

FERNANDA MARA DA SILVEIRA

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO EMPREGO DA MOINHA DE  
CARVÃO VEGETAL, DO COQUE VERDE DE PETRÓLEO E DA CASCA DE CAFÉ  
COMO COMBUSTÍVEL EM FORNOS DE CAL

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia de  
Produção do UNIFOR-MG, como requisito  
parcial para obtenção do título de bacharel  
em Engenharia de Produção.

Orientador (a): Prof. Ms. Murilo Machado de  
Barros.

Co-orientador (a): Prof. Ms. Bruno Daniel  
Soares.

FORMIGA – MG

2012

Fernanda Mara da Silveira

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO EMPREGO DA MOINHA DE  
CARVÃO VEGETAL, DO COQUE VERDE DE PETRÓLEO E DA CASCA DE CAFÉ  
COMO COMBUSTÍVEL EM FORNOS DE CAL

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
ao curso de Engenharia de Produção, como  
requisito parcial para obtenção do título de  
bacharel em Engenharia de Produção.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Ms. Murilo Machado de Barros  
Orientador

---

Prof. Dr. Alex Magalhães de Almeida  
UNIFOR – MG

Formiga, 5 de dezembro de 2012.

Dedico este trabalho aos meus pais; Marli e João; e aos meus irmãos; Gilson, Dárcio e Leandro, que lutam diariamente ao meu lado, transmitindo fé, amor, alegria, determinação, paciência, e coragem, tornando meus dias mais felizes. Sem vocês eu não seria nada!

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por iluminar constantemente o meu caminhar.

Agradeço aos meus pais e também aos meus irmãos, pois proporcionaram para mim muito carinho e apoio para lidar com os obstáculos advindos no meu dia a dia.

Enfatizo um agradecimento especial ao meu orientador, Prof. Ms. Murilo Machado de Barros, e ao meu co-orientador, Prof. Ms. Bruno Daniel Soares, que demonstraram muita paciência e compreensão, auxiliando-me na elaboração desse trabalho primordial para minha formação acadêmica.

Nesse momento, sintetizo também um grandioso agradecimento as minhas colegas e amigas, Bruna e Rozilene, que fizeram parte da minha vida durante esses cinco anos de graduação, proporcionando e ao mesmo tempo dividindo momentos de alegrias, tristezas, experiências, conquistas,...

## RESUMO

Com o crescimento global da população, houve um aumento considerável no consumo de energia, na extração de recursos naturais, além da necessidade cada vez maior da produção de insumos agrícolas para fins alimentícios. Nesse contexto, as ações antrópicas no meio ambiente têm sido cada vez mais expressivas, resultando na escassez dos recursos naturais e no impacto ambiental em termos de geração de poluição e desperdício de fontes naturais. Dessa forma, o emprego de biomassa proveniente de resíduos agrícolas torna-se uma alternativa energética bastante promissora. O presente trabalho verificou a viabilidade econômica do emprego da moinha de carvão vegetal, do coque verde de petróleo de baixo teor de enxofre e da casca de café como fonte de combustível para processos altamente demandadores de energia, os fornos de cal. Para tanto, os combustíveis foram caracterizados em termos de poder de queima, disponibilidade e custo de aquisição. Os resultados obtidos mostraram que a mistura dos combustíveis 20 % Casca de Café (CC) com 80 % Moinha de Carvão Vegetal (MCV) foi a que apresentou menor custo para a produção de 1 ton de cal e a mistura de 30 % do Coque Verde de Petróleo (CVP) de baixo teor de enxofre com 70 % de Moinha de Carvão Vegetal (MCV) foi a que apresentou maior custo para a produção de 1 ton de cal.

Palavras-chave: Energia. Recursos naturais. Biomassa.

## **ABSTRACT**

With the global population growth, there was a considerable increase in energy consumption in the extraction of natural resources, beyond the necessity of increasing production of agricultural inputs for food. In this context, the anthropogenic actions on the environment have been increasingly significant, resulting in scarcity of natural resources and the environmental impact in terms of pollution and waste generation from natural sources. Thereby, the use of biomass from agricultural waste becomes a promising alternative. This study identified the economic viability of chaff charcoal, green petroleum coke, low sulfur and coffee husk as a fuel source for processes highly consumer of energy, lime kilns. Therefore, the fuels were characterized in terms of power to burn, availability and cost. The results showed that the mixture of fuels 20% Bark Café (CC) with 80% chaff Charcoal (MCV) showed the lowest cost to produce 1 ton of lime and a mixture of 30% of Coke Petroleum Green (CVP) of low sulfur with 70% chaff Charcoal (MCV) showed the higher cost to produce 1 ton of lime.

Keywords: Energy. Natural resources. Biomass.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de conversão energética da biomassa .....	32
Figura 2 – Forno horizontal rotativo.....	39
Figura 3 – Bomba calorimétrica IKA C 2000 basic/control .....	41
Figura 4 – Carvão vegetal no Brasil .....	45
Figura 5 – Distribuição do coque verde de petróleo no Brasil .....	46
Figura 6 – Áreas cafeeiras .....	47

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação dos biocombustíveis.....	33
Quadro 2 – Relação de eficiência energética.....	43
Quadro 3 – Relação de entrada de combustível .....	43
Quadro 4 – Relação de custo.....	44

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Produção de coque de petróleo no Brasil .....	26
Gráfico 2 – Consumo de carvão vegetal em Minas Gerais e São Paulo .....	27
Gráfico 3 – Estimativa mensal de colheita de café .....	29
Gráfico 4 – Oferta interna de energia no Brasil em 2008 .....	35

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**PCI** – Poder Calorífico Inferior.

**ANEEL** – Agência Nacional de Energia Elétrica.

**CO<sub>2</sub>** – Dióxido de Carbono.

**GW** – Gigawatt.

**MW** – Megawatt.

**BNDES** – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social.

**°C** – Grau Celsius.

**BEN** – Balanço Energético Nacional.

**Kg** – Quilograma.

**Kcal** – Quilocaloria.

**MV** – Material volátil.

**CF** – Carbono fixo.

**Cz** – Cinzas.

**%** – Porcentagem.

**MCV** – Moinha de carvão vegetal.

**CVP** – Coque verde de petróleo.

**CC** – Casca de café.

**M** – metro.

**Ton** – Tonelada.

**PCS** – Poder calorífico superior.

**H** – Hidrogênio.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Objetivos.....	16
1.1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.2	Objetivos Específicos.....	16
1.2	Justificativa.....	16
1.3	Formulação do Problema.....	17
1.4	Hipótese (s).....	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1	Setor Energético.....	18
2.2	Setor Energético no Brasil.....	19
2.3	Setor Energético no Mundo.....	21
2.4	Fontes de Energia.....	22
2.4.1	Renováveis.....	23
2.4.2	Não Renováveis.....	24
2.4.3	Alternativas.....	25
2.4.4	Coque de Petróleo.....	25
2.4.5	Carvão Vegetal.....	27
2.4.6	Casca de Café.....	28
3	BIOMASSA.....	30
3.1	Biomassa no Brasil.....	34
3.2	Biomassa no Mundo.....	36
4	A CAL.....	36
4.1	Consumo Energético.....	37
5	METODOLOGIA.....	39
5.1	Caracterização do Trabalho.....	39
5.2	Eficiência Energética.....	40
5.3	Análise Técnico-Econômica.....	40
5.4	Caracterização dos Sólidos.....	40
5.5	Determinação do Poder Calorífico Inferior (PCI).....	41
6	RESULTADOS.....	43
6.1	Avaliação Geral dos Combustíveis.....	43

6.2	Disponibilidade de Matriz Energética.....	44
7	CONCLUSÃO.....	48
8	REFERÊNCIAS.....	49

## 1 INTRODUÇÃO

Com a crise do petróleo, ocorrida na década de 1970, surgiram novos pensamentos sobre sustentabilidade ambiental e econômica, provocando assim novos ideais de geração e consumo de energia.

A partir do incessante crescimento global, o mundo atualmente tem enfrentado diversas mudanças, principalmente climáticas. As principais causas do aquecimento global são originadas a partir da emissão de gases poluentes, emitidos principalmente do uso dos combustíveis fósseis, pelo desmatamento e queimadas das florestas. Assim, torna-se necessário investir em técnicas para preservação do planeta, dentre as quais a geração de energia advinda da biomassa é considerada como ponto estratégico para o futuro, por esta ser uma fonte de energia renovável e apresentar características quanto à redução de emissões de gases de efeito estufa.

Nesse sentido, o Brasil em fase de desenvolvimento econômico, vem enfrentado uma fase de reestruturação em seu setor energético. Devido a real necessidade, o país vem desenvolvendo fatores para aumentar a capacidade energética por meio de diferentes fontes de energia renovável e limpa, que causam menos impacto ao meio ambiente.

Dentre os mais diversos processos que demandam consumo de energia proveniente da queima direta de fontes de combustíveis, os fornos de calcinação estão entre os processos mais conhecidos e difundidos no meio industrial. A aplicação desse tipo de forno se dá, dentre outros processos, na produção de cimento e cal virgem. A cal é um dos produtos mais consumidos no planeta devido sua diversidade de aplicação. Com a crescente demanda da cal, torna-se necessário que a indústria da cal faça investimentos em tecnologia para que a mesma consiga atender o mercado. Outro aspecto importante se dá pelo fato do processo de fabricação da cal apresentar a maior parcela de seu custo de produção relacionada ao consumo de matriz energética.

Atualmente com o desenvolvimento tecnológico é possível investir na diversificação da matriz energética devido à disponibilidade de diferentes fontes energéticas com alto poder calorífico e com baixo custo, podendo assim ampliar consideravelmente a participação de recursos renováveis na matriz energética mundial.

Este trabalho tem como principal objetivo identificar a viabilidade econômica da utilização da moinha de carvão vegetal, do coque verde de petróleo com baixo teor de enxofre e da casca de café como combustível em fornos de cal.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

Este trabalho visa a análise econômica da queima direta da moinha de carvão vegetal, do coque verde de petróleo com baixo teor de enxofre e da casca de café como combustível em fornos de cal.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Estudar a disponibilidade e o custo de aquisição dos determinados combustíveis;
- Analisar o poder de queima da moinha de carvão vegetal, do coque verde de petróleo com baixo teor de enxofre e da casca de café em termos de poder calorífico inferior (PCI).

## **1.2. Justificativa**

Diante do crescente consumo mundial de energia, sendo este proveniente principalmente de combustíveis fósseis, cabe ao próprio ser humano encontrar alternativas energéticas renováveis que substituam tais combustíveis fósseis.

Atualmente, é gerado grande volume de resíduos pelas indústrias de transformação da madeira e pela agricultura, esses resíduos podem ser aproveitados para geração de energia, ajudando assim na preservação da natureza e na economia de energia. Os resíduos podem ser transformados em energia através da combustão direta ou pela pirólise.

Analisando o aumento de consumo de energia, a escassez dos recursos naturais e o desperdício de resíduos agrícolas, este trabalho estabelece o emprego de biomassa proveniente de resíduos agrícolas como matriz energética para o processo produtivo da cal, o qual, além de valorizar o resíduo à matriz energética, reduz a emissão de gases de efeito estufa.

Os resultados da pesquisa contribuirão para a promoção do desenvolvimento sustentável e econômico através da minimização de gases do efeito estufa, melhorias das condições ambientais, promoção do uso de energia limpa e possível redução dos custos no processo produtivo.

Justifica realizar esta pesquisa por apresentar combustíveis alternativos e seus benefícios para o processo produtivo da cal, possibilitando assim o desenvolvimento social, econômico e ambiental.

### **1.3. Formulação do Problema**

É possível oferecer produtos com qualidade e reduzir os custos de produção buscando diferentes fontes de energia para o processo produtivo da cal?

### **1.4. Hipótese (s)**

Será possível identificar entre os combustíveis, mencionados neste trabalho, qual é mais vantajoso economicamente no processo de calcinação?

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. Setor Energético

Há aproximadamente 250 anos atrás, a sociedade dependia inteiramente das fontes naturais de energia. Atualmente, o serviço que o ser humano dispõe depende, principalmente, do uso de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), mas com a fragilidade que se encontra as fontes naturais de combustíveis e a sociedade consciente do impacto ambiental causados por esse tipo de combustível, o mundo está mais cauteloso quanto ao uso desses combustíveis. (WALISIEWICZ, 2008)

Segundo Branco (1990), a Revolução Industrial, ocorrida no século XVIII, caracterizou-se principalmente pelo domínio da energia. Essa revolução aconteceu na Inglaterra, devido a suas enormes minas de carvão que proporcionaram o emprego de bombas a vapor para retirar água das minas. Com os aperfeiçoamentos de James Watt foi possível fazer uso do vapor para movimentar máquinas industriais, embarcações e locomotivas.

A partir do domínio da energia a vapor, surgiu uma nova energia: a energia elétrica. A qual foi utilizada em 1830, pela primeira vez, como meio de comunicação através dos fios telégrafos. A energia foi aplicada na produção de luz em 1878 e como força de tração em 1880. Sendo nessa época construídas as primeiras usinas de energia elétrica em Nova Iorque e em Londres. No final da década de 1880 surgem, também, os veículos movidos por motores de combustão interna, dando início à energia do petróleo.

Com a primeira explosão atômica, ocorrida em 1945, uma nova forma de energia começou a ser desenvolvida: a energia contida no núcleo do atômico. Desses anos até os anos atuais, o homem descobriu e vem desenvolvendo novas fontes de energia.

Com os dois choques do petróleo, ocorridos em 1973 e 1979, segundo Reis, Fadigas e Carvalho (2005), mudou-se completamente o fornecimento energético no mundo. A alta dos preços e o embargo das exportações petrolíferas fizeram os países importadores adotar políticas para enfrentarem a crise. A diversificação de seus fornecedores externos, a substituição do petróleo por outras fontes de energia, a implantação de programas de uso racional de energia e a reestruturação de seus parques industriais são alguns exemplos de políticas que foram adotadas.

Ainda segundo Reis, Fadigas e Carvalho (2012), o setor do petróleo, o gás natural, o setor carbonífero, a energia nuclear e os recursos energéticos renováveis do cenário dos recursos energéticos são caracterizados como:

- O Setor de Petróleo: o petróleo é um líquido oleoso que se encontra no subsolo em diversas profundidades, sendo classificado por três características: base, densidade e teor de enxofre. As reservas de petróleo são definidas como o volume, comercialmente, que se pode extrair de uma jazida, sob condições econômicas e por métodos de recuperação.
- O Gás Natural: é um combustível fóssil encontrado no subsolo. As reservas de gás natural ocorrem em bacias sedimentares, podendo ser encontrado nas formas de: gás livre e gás dissolvido no óleo.
- O Setor Carbonífero: o carvão mineral é um combustível de origem fóssil, formado a partir da decomposição de materiais orgânicos. Sendo encontrado em jazidas localizadas no subsolo e extraído pelo sistema de mineração.
- A Energia Nuclear: é a energia contida no núcleo dos átomos, mantendo prótons e nêutron juntos, sendo obtida através da fissão do núcleo do átomo de urânio enriquecido. O urânio é encontrado na natureza.
- Recursos Energéticos Renováveis: são essenciais na busca do desenvolvimento sustentável, são compostos por: energia solar, energia termossolar, energia solar fotovoltaica, energia hidráulica, energia eólica, energia da biomassa, energia oceânica, energia das marés, energia das ondas, energia geotérmica e energia do hidrogênio.

De acordo com a ANEEL (2008), a grande oferta de energia obtida principalmente pelos combustíveis fósseis durante o século XX deu um grande apoio ao crescimento da economia mundial, já nos primeiros anos do século XXI, o cenário mudou devido à busca pelo desenvolvimento sustentável, o que se torna necessário substituir as fontes de energia tradicionais por fontes de energia menos poluente.

## **2.2. Setor Energético no Brasil**

No Brasil, mesmo com as dificuldades técnicas, financeiras e de pessoal com que a administração pública vem se deparando ao decorrer dos últimos anos, principalmente as entidades de meio ambiente, tanto o licenciamento quanto a

avaliação de impacto ambiental representam um importante avanço institucional para a gestão do meio ambiente. Todas essas dificuldades reproduzem a imagem da lentidão dos processos de licença e no desenvolvimento das atividades de orientação e revisão dos estudos de impacto ambiental. (MARQUES, HADDAD, MARINS, 2001)

De acordo com Pedrosa (2005), a fonte hidráulica é a principal fonte da matriz energética brasileira. Sendo esta considerada a fonte mais limpa, mas ela apresenta um grande impacto no meio ambiente, tendo interferência direta na fauna e na flora e, também, no deslocamento de comunidades. Já as fontes de geração térmica são consideradas fontes poluidoras, pois emitem CO<sub>2</sub> responsável pelo aquecimento global.

A maior utilização das fontes não renováveis no Brasil se dá no setor de transportes, fundamentado no uso dos derivados de petróleo. Por outro lado, a geração hidrelétrica é a grande fonte de energia elétrica no início do século XXI, devido ao amplo potencial disponível.

Segundo Reis, Fadigas e Carvalho (2012), o Brasil conta com:

- Aproximadamente cinco milhões de quilômetros quadrados em bacias sedimentares, possuindo a segunda maior reserva de petróleo depois da Venezuela;
- Cerca de 364,2 bilhões de metros cúbicos de reservas provadas de gás natural em 2008, sendo aproximadamente 82% dessas reservas encontradas no mar;
- Cerca de 32,32 bilhões de toneladas de reservas de carvão mineral em 2008;
- A maior reserva geológica de urânio do mundo;
- Um número muito grande de fabricantes de coletores solares;
- Uma abundância de recurso hídrico, sendo instalada em 2010, uma capacidade em usinas hidrelétricas de 76,4 GW;
- Uma capacidade instalada em 2009 de aproximadamente 794, 3 MW em centrais eólicas; e
- Diversas fontes de energia da biomassa.

### 2.3. Setor Energético no Mundo

De acordo com Silveira, Reis e Galvão (2000), aproximadamente 30% a 40% da energia usada no mundo é na forma de eletricidade, o que representa a grande importância da eletricidade no mundo de hoje. Percebe-se que haverá um crescimento dessa participação no consumo energético futuro, por diversas características desse tipo de energia, como:

- Flexibilidade e confiabilidade;
- Diversas alternativas para produção de energia limpa;
- Limpeza nos usos finais;
- Domínio da tecnologia;
- Facilidade de integração às novas tendências e tecnologias de globalização; e
- Habilidade para fornecer os serviços de energia na sociedade.

Nos últimos cinco anos, ainda segundo Silveira, Reis e Galvão (2000), a questão energética apresentou uma posição central na agenda ambiental mundial. Pois a matriz energética mundial está subordinada em aproximadamente 80% de combustíveis fósseis, os quais, quando são queimados, emitem gases que aumentam a concentração dos gases que causam o efeito estufa.

Pereira (2009), cita que existe em torno de 85 mil turbinas eólicas no mundo. Sendo que a indústria do vento movimenta aproximadamente mais de 14 bilhões de dólares anualmente. Os Estados Unidos é o grande gerador de energia eólica do mundo.

Segundo Reis, Fadigas e Carvalho (2012), o Mundo conta com:

- Mais de oitenta países se encontra o gás natural, sendo que, as reservas provadas de gás natural somavam, em 2009, aproximadamente 187, 49 trilhões de metros cúbicos;
- Aproximadamente 21 trilhões de toneladas de recursos totais de carvão, em 2008;
- Cerca de 3.107.000 toneladas de urânio; entre outros.

Walisiewicz (2008) descreve que em menos de 0,5% de área do Oriente Médio se encontra em média mais de 50% do petróleo do mundo e nos Estados Unidos se encontra um quarto do carvão mundial. Os Estados Unidos até a década de 1950 não dependiam de outros países para atender a sua demanda doméstica

de petróleo, mas atualmente o país consome a metade do petróleo que é importado do Oriente Médio, América Central e Nigéria.

#### **2.4. Fontes de Energia**

Para Mano, Pacheco e Bonelli (2005, p. 51) "energia é a capacidade que um sistema tem de produzir trabalho [...]".

Energia, segundo Walisiewicz (2008), é um tanto difícil de definir, sendo possível identificá-la devido aos seus efeitos. Para os cientistas a energia é definida como capacidade de se executar um trabalho.

Como explica Braga et al. (2005), o Sol é constituído a principal fonte de energia. Sendo que 99% da energia provinda do Sol é utilizada pelos ecossistemas e 1% dessa energia é obtida pelas chamadas fontes primárias de energia.

Segundo Silveira, Reis e Galvão (2000), a questão energética tem um importante significado no contexto ambiental e na busca pelo desenvolvimento sustentável. Esta questão tem influenciado nesses contextos porque o suprimento de energia é uma das questões principais para o desenvolvimento econômico e devido aos diversos desastres ecológicos e humanos, ocorridos nas últimas décadas.

De acordo com BNDES (2011), as fontes de energia são importantíssimas e indispensáveis à nossa vida e ao desenvolvimento econômico do país. As fontes de energia podem ser classificadas em primária e secundária, conforme sua origem. A fonte de energia primária, conhecida também como fonte de energia natural, é a fonte de energia existente em sua forma natural, por exemplo, o carvão mineral, o petróleo e o gás natural, a energia hídrica, solar, eólica, de biomassa, entre outras. As fontes de energia secundária são as fontes que não se encontra em sua forma natural, são transformadas a partir das fontes primárias, por exemplo, a energia elétrica, gasolina, carvão vegetal, entre outras.

As possíveis fontes primárias de energia são transformadas pelo homem em diversas formas de energia, sendo essas energias utilizadas para o desenvolvimento das atividades humanas. A energia é utilizada pelo homem em diversas situações, como por exemplo: para o aquecimento de ambientes, processos industriais, transporte, aquecimento de alto-forno, etc. (BRAGA et al., 2005)

Para Reis, Fadigas e Carvalho (2012), as fontes primárias de energia são as que se encontram na natureza e que ainda não foram transformadas. No mundo são utilizadas oito fontes primárias para produzir energia, por meio de diferentes processos. As oito fontes são:

- Combustíveis fósseis;
- Elementos radioativos;
- Recursos hídricos;
- Ventos;
- Radiação solar;
- Biomassa;
- Geotérmicas; e
- Oceanos.

Ainda segundo Reis, Fadigas e Carvalho (2012), as fontes primárias são classificadas em fontes de energia renováveis e não renováveis. Sendo as fontes renováveis aquelas que se renovam sucessivamente na natureza, por isso são inesgotáveis. Já as fontes não renováveis são aquelas passíveis de se esgotar, pois seu processo de desenvolvimento é muito lento comparado com o ritmo de consumo que o ser humano faz delas.

As fontes de energia podem ser classificadas em: Renováveis, Não renováveis e Alternativas.

#### **2.4.1. Renováveis**

Conforme Braga et al. (2005), as fontes renováveis tem origem direta ou indiretamente da energia solar. Atualmente, as radiações diretas provenientes do Sol são utilizadas para o desenvolvimento das diversas atividades domésticas (aquecimento de água, do ambiente, entre outras). As fontes renováveis indiretas (vento, vazão de rios, entre outras) são estabelecidas pela quantidade de energia disponível no tempo.

Segundo Goldemberg (1998), a utilização das fontes de energia renováveis é uma maneira de minimizar a emissão dos gases que causam o efeito estufa. Sendo aproximadamente 80% do consumo mundial de energia primária são adquiridas dos combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás) e a queima desse tipo de combustível

é o principal emissor do dióxido de carbono, o qual é um dos causadores do aquecimento global e, também, causador das mudanças climáticas.

A energia das marés, energia geotérmica, energia solar, biogás, biocombustível líquido e gás natural são alguns exemplos de energia proveniente das fontes renováveis, que segundo Braga et al. (2005) podem ser classificadas como:

- Energia das marés: é a energia obtida pela variação do nível das marés.
- Energia geotérmica: é a energia obtida pelo calor do planeta Terra.
- Energia solar: é a energia obtida pela radiação solar.
- Biogás: é a energia obtida do gás natural a partir da decomposição anaeróbica de compostos orgânicos.
- Biocombustível líquido: a energia proveniente desse tipo de combustível se resulta pela sua queima. É obtido a partir da fermentação e decomposição anaeróbica de diversos tipos de biomassa.
- Gás hidrogênio: a energia proveniente desse gás se resulta pela sua queima, sendo esse combustível gasoso gerado por processos eletroquímicos.

#### **2.4.2. Não Renováveis**

De acordo com Silva (2009), as fontes de energia não renováveis são atualmente as que mais abastecem o sistema energético mundial, entretanto são as que mais causam problemas ambientais, sendo nomeadas como “energias sujas”.

Braga et al. (2005) cita alguns exemplos de fontes de energia não renováveis e as classifica como:

- Petróleo: é uma substância natural negra de composição química heterogênea e é constituído basicamente por hidrocarbonetos.
- Xisto betuminoso: são rochas sedimentares que possuem uma mistura de compostos orgânicos.
- Alcatrão: é uma mistura de vários componentes e é obtido em depósitos arenosos.
- Gás natural: é uma mistura de hidrocarbonetos com o gás metano. O gás natural é encontrado em depósitos subterrâneos.
- Carvão: é uma rocha orgânica formada por carbono com pouca quantidade de água, enxofre e nitrogênio.

- Depósitos geotérmicos confinados: formados em calor de baixa temperatura, sendo depositados em zonas subterrâneas em forma de vapor seco, vapor úmido e água quente.
- Fusão nuclear: é o processo em que a energia é armazenada no núcleo dos átomos, unindo prótons e nêutrons.

### **2.4.3. Alternativas**

Sendo a energia um item essencial para o desenvolvimento social e econômico e que estudos apontam que a oferta de petróleo não suprirá a demanda da crescente população mundial, é possível identificar a necessidade de adotar fontes alternativas de energia, principalmente renováveis. Outro fator que também evidencia a necessidade da busca por fontes alternativas de energia é o aquecimento global e as mudanças climáticas. (GOLDEMBERG, 2003)

Segundo Branco (1990), com o crescimento da demanda causada pelos modernos processos de produção, transporte e conforto em geral e, também, o esgotamento das fontes naturais de energia de biomassa e energia fóssil faz com que a maioria dos esforços científicos e tecnológicos do mundo estejam voltados para conseguir fontes alternativas de energia.

De acordo com Mano, Pacheco e Bonelli (2005), as fontes alternativas de energia natural renovável como, por exemplo, a biomassa, o Sol e os ventos e as não renováveis como o urânio e a energia fóssil já foram desenvolvidas e aplicadas em vários países. As fontes alternativas de energia renovável como a energia dos oceanos, a geotérmica e o hidrogênio estão em estágio de desenvolvimento e são de suma importância e utilização para o futuro.

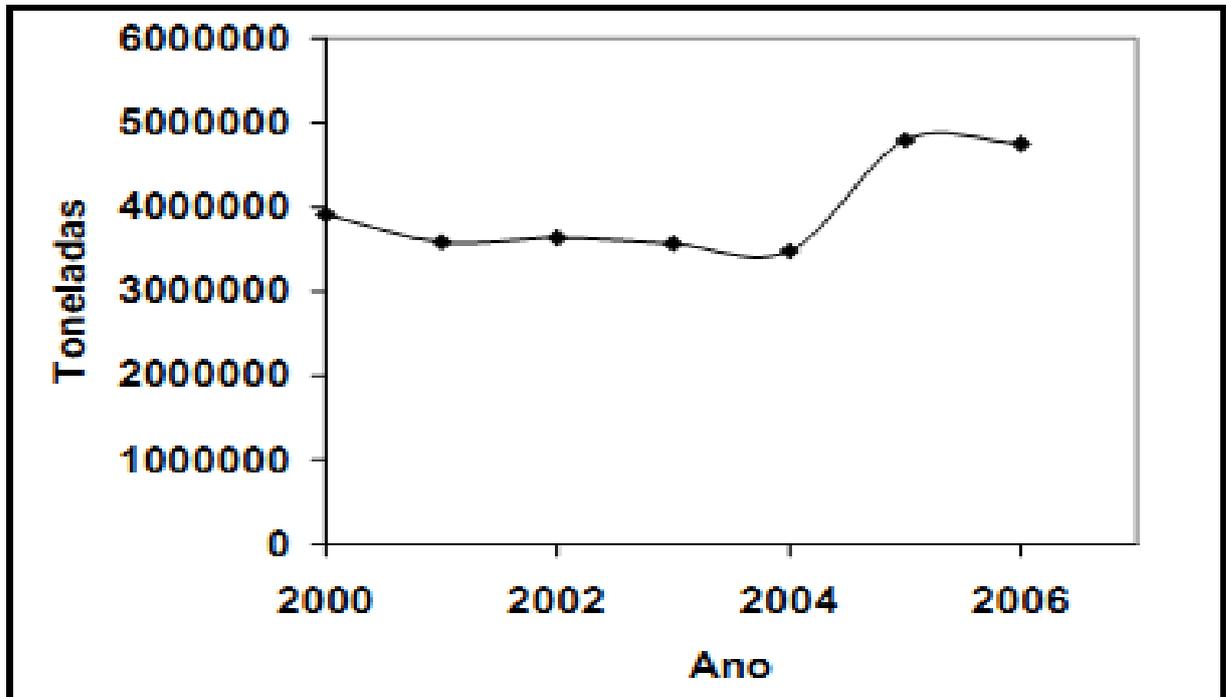
### **2.4.4. Coque de Petróleo**

O coque de petróleo, segundo Speight (2004), é um subproduto do refino do petróleo, contendo alto poder calorífico e um conteúdo de enxofre que é dado a determinado tipo de petróleo ao qual o coque se origina.

A Petrobrás produz dois diferentes tipos de coque de petróleo, o Coque Grau Combustível e o Coque Grau Anodo. (CAMARGO et al., 2006)

O gráfico 1 apresenta a produção de coque de petróleo no Brasil durante o período de 2000 a 2006.

Gráfico 1 – Produção de coque de petróleo no Brasil



Fonte: adaptado de Agência Nacional de Petróleo - ANP (2007)

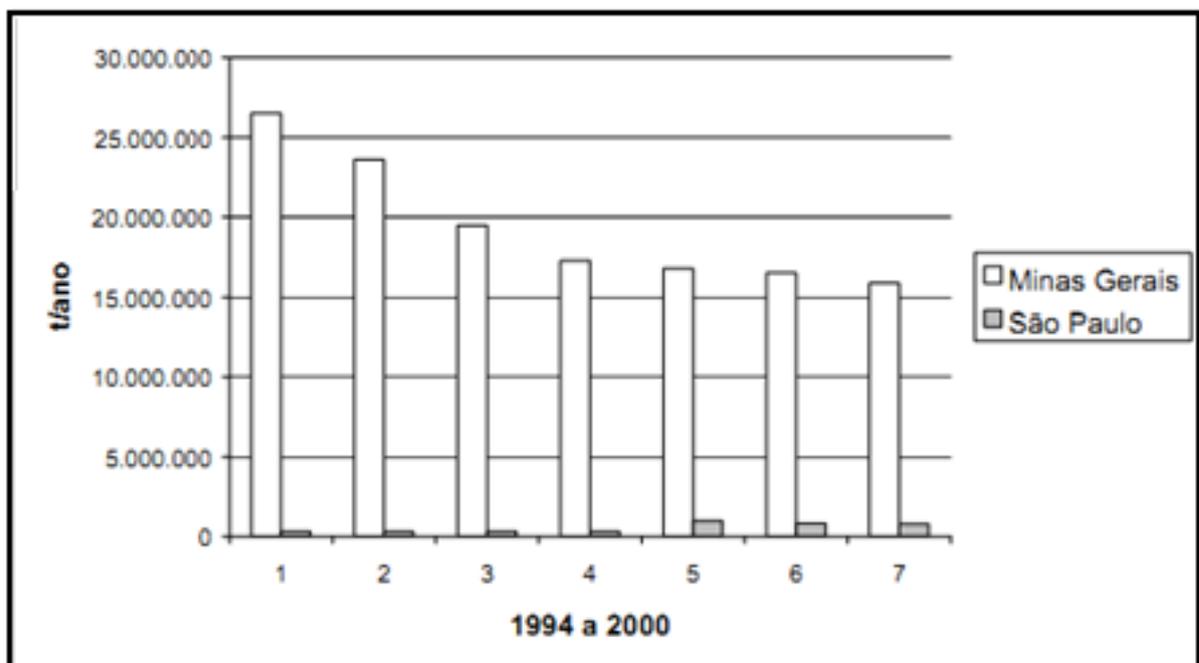
Segundo Salvador et al. (2003), o coque de petróleo do Brasil é avaliado como baixo teor de enxofre devido ao tipo de processamento de petróleo. O coque de petróleo brasileiro apresenta, em média, 0,8 % de enxofre e alguns coques importados apresentam mais de 7 % de enxofre.

Aproximadamente 75 % da produção de coque de petróleo são empregadas como fonte energética nas refinarias de petróleo, nas termelétricas e nas indústrias de cimento. Cerca de 40 % da produção mundial são empregadas nas refinarias de petróleo, nas indústrias de cimento são 16 %, na geração de energia elétrica são 14 % e os 5 % restantes são utilizados como fonte energética em grandes indústrias. (DYNAMIS, 2006)

### 2.4.5. Carvão Vegetal

O maior produtor de carvão vegetal atualmente é o Brasil, sendo destinado mais de dois terços de sua produção para a indústria siderúrgica e metalúrgica, principalmente para o estado de Minas Gerais. Nos demais estados brasileiros o carvão vegetal é utilizado para cocção de alimentos, como por exemplo, o estado de São Paulo. O gráfico 2 mostra a diferença de consumo de carvão vegetal no estado de Minas Gerais e São Paulo.

Gráfico 2 – Consumo de carvão vegetal em Minas Gerais e São Paulo



Fonte: ABRACAVE/ANFPC, 2001.

Conforme Castro (1994), a madeira nativa continua sendo utilizada para produzir carvão vegetal, sendo a grande maioria de desmatamentos de cerrados no Brasil Central (Minas Gerais, Mato Grosso e Goiás).

Oliveira & Almeida (1982), descrevem que a produção e o uso do carvão vegetal como fonte energética estão embasados em, principalmente, dois motivos:

- É uma fonte renovável, e
- É uma alternativa estratégica para o país desprovido de redutor fóssil.

O carvão vegetal é um resíduo sólido obtido a partir da carbonização da madeira, que é queimada ou aquecida em uma atmosfera restrita de ar, sendo assim, expulsos a água, os compostos voláteis, uma parte dos compostos orgânicos condensáveis à temperatura ambiente, dentre outros, sem ocorrer à combustão total, devido à escassa quantidade de oxigênio.

A madeira entra em processo de carbonização quando é aquecida em presença de controladas quantidades de oxigênio e com temperaturas acima de 300 °C, tirando a água, líquidos orgânicos e gases não consideráveis, ficando assim o carvão. (GOMES & OLIVEIRA, 1982)

Conforme Brito (1990), a produção de carvão vegetal no Brasil é obtida, principalmente, em fornos de alvenaria (fornos de superfície). O método de produção de carvão vegetal é primitivo e o controle operacional dos fornos de carbonização é baixo, tendo assim pouco controle qualitativo e quantitativo em sua produção. Além disso, a tecnologia utilizada no processo de carbonização descarta milhares de toneladas de compostos químicos, devida o pouco aproveitamento da madeira na forma de carvão vegetal, esse aproveitamento é de apenas 30 a 40%.

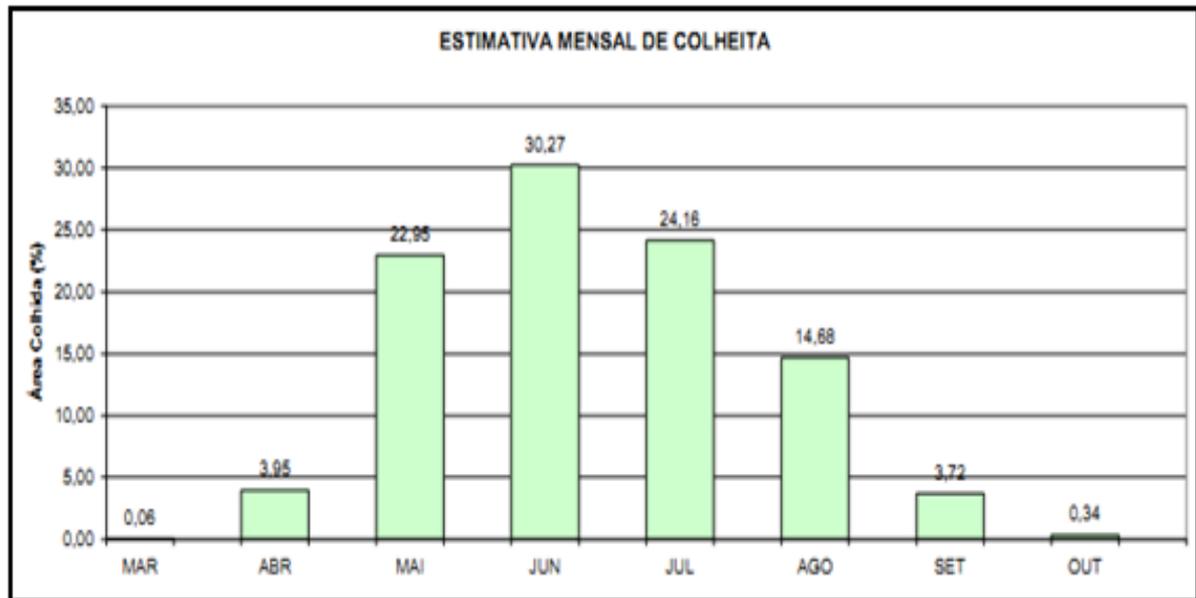
Atualmente necessita-se cada vez mais desenvolver pesquisas e tecnologias para o processo de carbonização, pois o carvão vegetal é um grande promissor e eficaz alternativa energética, tanto para a produção siderúrgica, para diversos segmentos industriais e, também, como possível substituto dos derivados do petróleo. (NETTO, 1980)

#### **2.4.6. Casca de Café**

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento - Conab, a produção de café para a safra de 2012 será de 50,45 milhões de sacas de 60 quilos do produto beneficiado, ou seja, teve um aumento de 16 % comparado com a safra anterior.

A área plantada de café no Brasil é de 2346,48 mil hectares, sendo a maior área plantada em Minas Gerais com 1218,9 mil hectares. O gráfico 3 mostra a estimativa mensal da colheita de café para o ano de 2012. Analisando o gráfico, percebe-se que os meses de maio a agosto são os meses em que mais acontece a colheita do café, conseqüentemente são os meses que se encontra a casca de café com maior facilidade.

Gráfico 3 – Estimativa mensal de colheita de café



Fonte: Companhia Nacional de Abastecimento - Conab, 2012.

O café além de ser uma bebida muito apreciada, o processamento dos grãos gera um resíduo (casca do café) que pode ser aproveitado como fonte energética, o que consequentemente diminuirá os custos das empresas e reduzirá a poluição ambiental. Durante o processo de cultivo do café, em média dois milhões de toneladas de cascas de café é jogado no lixo ou é aproveitado para adubação dos terrenos dos cafezais. No entanto, a casca de café possui um grande potencial energético que pode ser usada como um combustível alternativo, sendo ela uma opção energética de baixo custo e ecologicamente correta. A casca de café apresenta diversas vantagens se comparada aos combustíveis fósseis, é um combustível renovável, os compostos liberados na sua combustão são sequestrados pelos novos plantios, o que contribui com o efeito estufa, agrega valor a um resíduo que na maioria das vezes é descartado, entre outras. (MCTI, 2011)

De acordo com a revista Cafeicultura, a utilização da casca de café para produção de energia é uma ótima alternativa de renda para os produtores rurais, além de trazer benefícios sociais, econômicos e ambientais.

### 3 BIOMASSA

A biomassa pode ser definida de diversas formas, como segue:

Segundo a ANEEL (2008), biomassa é a matéria orgânica que pode ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica, sendo classificada como:

- Florestal: principalmente a madeira.
- Agrícola: soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outros.
- Rejeitos urbanos e industriais: sólidos ou líquidos, como o lixo.

Para Rosillo et al. (2005), a biomassa é uma fonte de energia renovável que pode desempenhar um papel importantíssimo no desenvolvimento de programas de energias renováveis e na formação de uma sociedade ecologicamente correta. O interesse pela biomassa como fonte de energia vem aumentando e os novos avanços tecnológicos indicam que ela pode se tornar cada vez mais eficiente e competitiva. O Brasil é considerado um país pioneiro no ressurgimento de sistemas de energia da biomassa.

Para Sanquetta (2002), biomassa é toda matéria que tem origem biológica.

De acordo com Nogueira e Rendeiro (2008), a biomassa diferentemente dos combustíveis fósseis é um hidrocarboneto composto por átomos de oxigênio. A biomassa possuindo átomos de oxigênio absorve menos oxigênio do ar, sendo assim menos poluente.

Biomassa é um termo genérico que se refere ao conjunto de recursos biologicamente renováveis, originados de material vegetal, susceptíveis de transformação em energia útil, tal como o calor, a eletricidade e a força motriz. Esses recursos têm origem diversificada: resíduos industriais e agrícolas, sobras de madeira de operações florestais, resquícios de plantações, plantas energéticas, como a cana-de-açúcar e os cereais, plantas oleoginosas, etc [...]. (MANO, PACHECO, BONELLI, 2005, p. 72).

Reis, Fadigas e Carvalho (2005), citam que o termo biomassa inclui uma série de vegetais que são formados pelo processo de fotossíntese, e também, pela utilização de resíduos gerados pela utilização dos vegetais.

De acordo com Mello (2001), fontes de energia de biomassa é a energia vinda das plantas como, por exemplo, a cana-de-açúcar, a mandioca, o dendê e o bagaço, que podem ser transformados em energia líquida, sólida, gasosa ou elétrica, adequando, assim, a preservação do meio ambiente.

Rosillo (2005) observa que a imagem da biomassa está mudando por três motivos, a saber:

- Os ponderáveis esforços realizados nos últimos anos, através de estudos, demonstrações e plantas-piloto, para se identificar um quadro real e equilibrado da utilização e do potencial da biomassa.
- O aumento da utilização da biomassa no setor energético, principalmente nos países industrializados.
- O considerável reconhecimento dos benefícios ambientais, locais e globais da utilização da biomassa e as medidas necessárias para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> e enxofre.

Conforme Cortez, Lora e Gómez (2008), os resíduos são recursos com significativo potencial para obtenção de energia, onde devem ser explorados de forma correta.

Fonte de energia renovável, quando utilizada adequadamente, a biomassa dispõe de vantagens ambientais que outros combustíveis fósseis não apresentam. A biomassa não emite na atmosfera óxidos de nitrogênio, enxofre e nem CO<sub>2</sub> durante sua queima, assim apresenta balanço zero de emissões. (REIS, 2003)

Segundo Miller (1985), as desvantagens relacionadas ao ambiente da aplicação da biomassa são: o conflito do uso da terra para a agricultura, o aumento nos casos de erosão, a poluição do solo e da água e a destruição do habitat. Em relação ao ambiente, as vantagens e desvantagens da biomassa dependem do tipo de biomassa utilizada.

“O recurso biomassa se apresenta de várias formas: madeira, serragem, palha, estrume, lixo de papel, refugo doméstico, esgotos, entre outros [...]”. (REIS, FADIGAS, CARVALHO, 2005, p. 266)

Segundo Miller (1985), a biomassa substituiu 15% da energia mundial, através da queima de madeira e estrume para esquentar fornos de cozinha e prédios.

De acordo com Mano, Pacheco e Bonelli (2005), a biomassa pode ser convertida em bioenergia através de vários processos que utilizam diversas tecnologias, como por exemplo: a combustão, a fermentação, a produção de combustíveis, a gaseificação, entre outras.

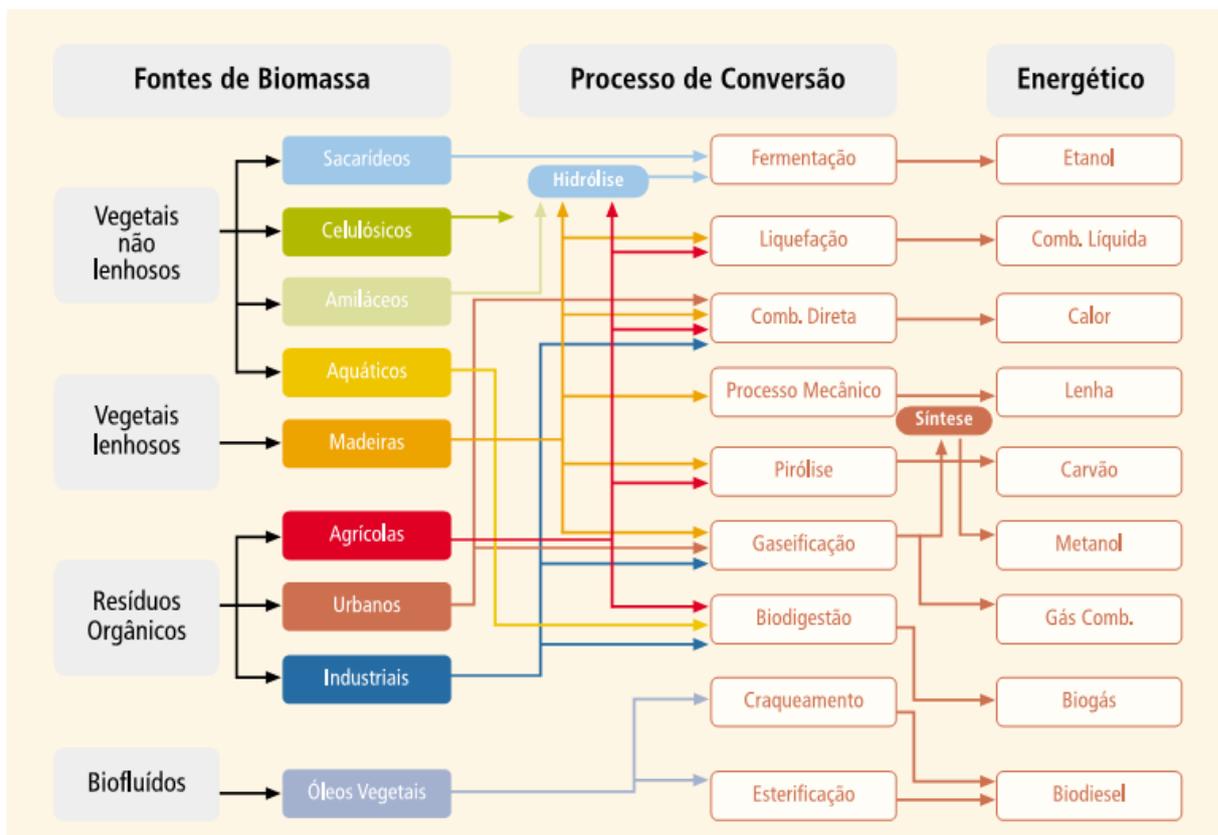
A combustão de restos de madeira em caldeiras e fornos libera calor que pode gerar eletricidade, aproveitável nas indústrias de madeira. A fermentação é a desintegração da biomassa por uma bactéria anaeróbica

para formar uma mistura de metano e dióxido de carbono; esse biogás é usado para a geração de eletricidade [...] A produção de substâncias líquidas pode ser feita graças à conversão biológica de açúcares de cana e de beterraba em álcool pela ação de bactérias. Pode ser conseguida ainda pela extração de sementes para obtenção de produtos com muita energia, como o biodiesel, ou pela conversão térmica, que consiste na decomposição de material vegetal na ausência de oxigênio e sob temperaturas elevadas. Já a gaseificação é a conversão de biomassa em combustível gasoso; os principais produtos visados são o hidrogênio e o monóxido de carbono, que são usados na geração de energia quanto na indústria química[...]. (MANO, PACHECO, BONELLI, 2005, p. 72)

Segundo Mano, Pacheco e Bonelli (2005), uma outra maneira de utilização de biomassa é através da compactação de resíduos agroindustriais a altas pressões, para a constituição de briquetes. O briquete é uma lenha de qualidade que tem densidade elevada, facilitando assim seu armazenamento e transporte.

Os principais processos de conversão energética da biomassa estão mencionados na figura 1.

Figura 1 – Processo de conversão energética da biomassa



Fonte: Balanço Energético Nacional – BEM. Brasília: MME, 1982.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/biomassa/5\\_3.htm](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/biomassa/5_3.htm). Acesso em: 17 abr. 2012.

As principais tecnologias de conversão energética da biomassa são caracterizados pela revista BNDES (2011) como:

- Fermentação: é um processo biológico em que os açúcares dos vegetais como, por exemplo a batata, o milho, a beterraba, a cana-de-açúcar, são transformados em álcool, através da ação de microorganismos (leveduras).
- Liquefação: é um processo de conversão da biomassa através de pressão e temperatura elevadas, aproximadamente entre 400 °C e 600 °C, em produtos, sendo estes a maioria líquidos.
- Combustão Direta: é um processo de conversão da energia química dos combustíveis em calor, a partir das reações dos elementos compostos com o oxigênio.
- Processo Mecânico: é um processo em que se realiza o tritramento ou o corte da madeira.
- Pirólise: é um processo de transformação de um combustível, geralmente a lenha, em outro combustível de maior qualidade e poder energético.
- Gaseificação: é um processo de transformação de combustíveis sólidos em gasosos, por meio de reações termoquímicas que envolve vapor quente e oxigênio.
- Biodigestão: é um processo de transformação bioquímica da matéria orgânica por meio das bactérias anaeróbicas que fabricam o biogás.

Segundo Reis, Fadigas e Carvalho (2005), a biomassa florestal (lenha e carvão vegetal) é usada no setor: residencial, agropecuário, comercial e industrial, sendo que no setor residencial e industrial a lenha e o carvão vegetal têm uma maior participação.

Os biocombustíveis são os combustíveis derivados da biomassa. O QUADRO 1 apresenta a classificação para os biocombustíveis.

QUADRO 1 – Classificação dos biocombustíveis

Biomassa oriunda das florestas nativas e plantadas	Lenha, carvão vegetal, briquetes, cavacos e resíduos sólidos oriundos do aproveitamento não energético da madeira.
--	--

QUADRO 1 – Classificação dos biocombustíveis (continuação)

Biomassa oriunda das florestas nativas e plantadas	Biocombustíveis líquidos e gasosos, subprodutos dos processos de conversão da madeira. P. ex.: metanol, gás de gaseificação.
Biocombustíveis não-florestais-agroindústria	Combustíveis sólidos e líquidos produzidos a partir de plantações energéticas. P. ex.: álcool da cana-de-açúcar.
	Resíduos de plantações energéticas. P. ex.: palhas, folhas e pontas da plantação de cana-de-açúcar.
	Resíduos de agroindústrias: casca de arroz, palha de milho, etc.
	Subprodutos animais: esterco de aves, bovinos, suínos, caprinos que são transformados em biogás.
	Combustíveis obtidos do processamento de oleaginosas (biodiesel), tais como: soja, milho, mamona, girassol, babaçu, dendê, entre outras.
Resíduos urbanos	Resíduos sólidos, líquidos e gasosos provenientes do processamento dos esgotos e lixos industriais, comerciais e domésticos.

Fonte: PHILIPPI Jr. (2012, p. 270).

### 3.1. Biomassa no Brasil

Segundo Reis, Fadiga e Carvalho (2005), o Brasil sendo um país de clima tropical e que possui grandes extensões territoriais é considerado um dos países mais ricos em biodiversidade e que disponibiliza diversos recursos de biomassa.

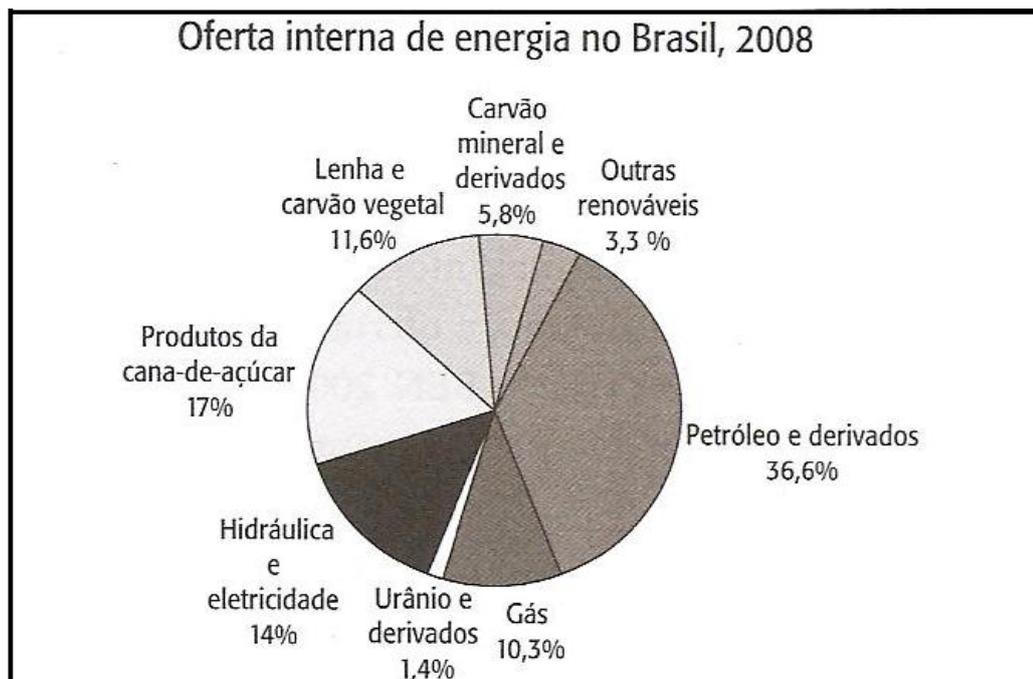
De acordo com Cortez, Lora e Gómez (2008), as primeiras biomassas no Brasil são:

- Resíduos Vegetais: são resíduos provenientes das colheitas dos produtos agrícolas, por exemplo a casca de café, o bagaço da cana, entre outros.
- Resíduos Sólidos Urbanos: são resíduos resultantes dos resíduos domiciliares e dos comerciais, por exemplo o lixo.
- Resíduos Industriais: são resíduos obtidos do beneficiamento de produtos agrícolas e florestais, por exemplo casca, cavaco, pó de serra, entre outros.
- Resíduos Animais: são os resíduos produzidos pela atividade biológica dos animais, por exemplo os dejetos dos suínos.
- Resíduos Florestais: são os resíduos orgânicos que sobram na floresta após a colheita, por exemplo os resíduos lenhosos.

Para Reis, Fadigas e Carvalho (2005), o Brasil é reconhecido na produção de álcool e na queima do bagaço da cana-de-açúcar para geração de eletricidade. Sendo o bagaço utilizado como combustível nas caldeiras das refinarias.

O gráfico 4 apresenta a porcentagem da participação das diversas fontes na oferta de energia no Brasil para o ano de 2008.

Gráfico 4 – Oferta interna de energia no Brasil em 2008



Fonte: (PHILIPPI Jr, 2012, p. 326).

### **3.2. Biomassa no Mundo**

No passado a biomassa perdeu a liderança para o carvão e em seguida pelo petróleo e gás natural, entretanto no decorrer dos anos com a crescente preocupação com o meio ambiente, os países vem realizando algumas iniciativas para fazerem uso de energias alternativas como a energia vinda da biomassa (CENBIO, 2008).

Durante vários anos as pessoas usaram a madeira e outros materiais vindos da biomassa como fonte energética, que atualmente representa em média 85% da energia utilizada em alguns países como o Quênia e o Nepal. Com a preocupação atual sobre as mudanças climáticas, existe uma busca importante sobre fontes de energia consideradas limpas, assim o mundo desenvolvido voltou à atenção para a biomassa, a qual é uma alternativa para substituir os combustíveis fósseis. (WALISIEWICZ, 2008)

Segundo Reis, Fadigas e Carvalho (2005), os países nos últimos anos tem se preocupado com o meio ambiente e com as fontes renováveis de energia, assim alguns países desenvolvidos procuram fazer uso da biomassa oriunda de florestas plantadas.

Segundo publicação da revista Veja (2011), 20% da energia do mundo, segundo pesquisadores ingleses, poderá vir da biomassa sem afetar a alimentação, para isso, será preciso investir em técnicas para aumentar a produtividade das plantações e para minimização do desperdício.

De acordo com Reis, Fadigas e Carvalho (2005), com os avanços tecnológicos no campo dos processos de conversão e a preocupação com os impactos ambientais, a biomassa voltará a ter uma maior participação na matriz energética dos países.

## **4 A CAL**

Segundo a NBR 6471 (ABNT, 1998), a cal virgem é classificada como um produto que resulta do processo de calcinação, o qual se constitui o óxido de cálcio juntamente com o óxido de magnésio, reagindo com água.

A cal recebe dos técnicos a denominação de material versátil e social, pela multiplicidade de aplicações e pela contribuição ao bem-estar das comunidades. Apesar do volume de sua produção ser inferior aos líderes mundiais da produção de origem mineral (petróleo, carvão e cascalho), a cal se destaca pelo seu consumo misto, seja como insumo, seja como produto [...]. (SOARES, 2007, p. 17).

De acordo com Bajay e Sant' Ana (2010), a cal é um produto de grande diversidade de aplicações, estando presente em diversos produtos e processos.

A rocha calcárea é a matéria prima usada no processo produtivo da cal. Sendo a cal virgem resultante da calcinação das rochas quando aquecidas em fornos com temperaturas, aproximadamente, maiores que 725°C. Sendo a reação química representada pela equação1:



Segundo a ABPC, a cal é aplicada em diversos setores como: construção civil, indústrias siderúrgica e metalúrgica, processos químicos e industriais, indústria alimentícia, agricultura, entre outros.

#### 4.1. Consumo Energético

De acordo com Soares (2007), para o processo produtivo da cal existem diferentes tipos de fornos que variam de acordo com a tecnologia da indústria. O consumo energético na produção da cal depende do tipo de forno utilizado pela indústria, portanto:

- Forno de barranco: forno de alvenaria, com revestimento de tijolos comuns cozidos, são grandes consumidores de combustível ( aproximadamente, de 280 Kg de óleo combustível ou 2,6 metros cúbicos de lenha, por tonelada de cal virgem);
- Forno AZBE: forno metálico, cilíndrico, com revestimento refratário e isolante, carga e descarga automáticas, com um consumo intenso de lenha, tem um consumo médio de combustível de 1,06 metros cúbicos de lenha por tonelada de cal virgem.
- Forno horizontal rotativo: forno cilíndrico rotatório inclinado, o consumo de combustível, óleo ou carvão pulverizado, é em média 1700 a 1600 Kcal/Kg;

- Forno MAERZ: forno metálico, com revestimento interno refratário e isolante, carga e descarga automáticas, com um consumo de combustível de, aproximadamente, 89 Kg de óleo combustível por tonelada de cal virgem.

## 5 METODOLOGIA

### 5.1. Caracterização do Trabalho

A pesquisa foi realizada em uma empresa produtora de cal, localizada em Arcos, cidade do Centro Oeste de Minas Gerais. A sua principal atividade é o beneficiamento de calcário para a produção da cal virgem. A empresa opera com um forno de calcinação do tipo horizontal rotativo com pré-calcinador, como ilustrado na figura 2, possui 2,10 m de diâmetro externo revestido de tijolos refratários e 30 m de comprimento, admitindo uma capacidade instalada de, aproximadamente, 75.000 ton/ano de cal virgem dolomítica.

Figura 2 – Forno horizontal rotativo



Fonte: empresa estudada.

O processo de produção da cal virgem demanda alto consumo energético para a queima direta do calcário. Nesse sentido, os gastos com a matriz energética constituem a maior parcela no custo fixo da cal (cerca de 30% dos custos de produção). Desse modo, foi realizado na empresa um estudo sobre a eficiência energética do forno rotativo para produção da cal em termos de percentual de aproveitamento de poder calorífico na calcinação do calcário. Em paralelo, foi

realizada uma análise técnica e econômica do combustível utilizado pela empresa no que se refere a custos de produção para cada tonelada de cal virgem produzida (R\$/ton de cal). De modo comparativo, foram realizadas avaliações com os diferentes tipos de combustíveis dentre os quais: moinha de carvão vegetal, casca de café e coque verde de petróleo com baixo teor de enxofre.

## **5.2. Eficiência Energética**

Para verificar a eficiência energética dos combustíveis foi tomada como referência a demanda de energia técnica para a produção de 1 ton de cal.

A eficiência energética dos combustíveis foi avaliada em três razões de combustíveis distintos:

- 100 % Moinha de Carvão Vegetal (MCV),
- 30 % de Coque Verde de Petróleo (CVP) COM baixo teor de enxofre com 70 % Moinha de Carvão Vegetal (MCV),
- 20 % de Casca de Café (CC) com 80 % de Moinha de Carvão Vegetal (MCV).

## **5.3. Análise Técnico-Econômica**

Para o estudo da análise técnico-econômica foram considerados critérios de disponibilidade de proximidade da planta, ou seja, os locais que fornecem o combustível para a empresa de calcinação estudada.

Para a avaliação da viabilidade econômica, foram assumidos critérios relativos à preço unitário. A análise econômica teve como base de cálculo custo da matriz energética por tonelada de cal produzida (R\$/kg de cal).

## **5.4. Caracterização dos Sólidos**

Para a avaliação técnico-econômica e de eficiência energética, os combustíveis foram caracterizados em termos de poder calorífico inferior (PCI).

As análises foram todas realizadas pelo laboratório de controle de qualidade da empresa. Ressalta-se que os equipamentos encontraram-se calibrados.

A seguir os métodos e instrumentos de ensaio utilizados na determinação dos teores mencionados neste trabalho foram determinados de acordo com as normas técnicas da ABNT.

### 5.5. Determinação do Poder Calorífico Inferior (PCI)

A determinação do poder calorífico inferior (PCI) foi realizada de acordo com a norma ABNT/NBR 8633/84, sendo utilizada a bomba calorimétrica IKA C 2000 basic / control, ilustrada na figura 3.

Figura 3: Bomba calorimétrica IKA C 2000 basic / control



Fonte: NBR 8633 e ASTM E711

Para a determinação do poder calorífico inferior (PCI) dos combustíveis foi utilizada a equação 2.

$$\text{PCI} = \text{PCS} - ((600 \times 9 \text{ H}) / 100) \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

PCI = poder calorífico inferior (kcal/kg);

PCS = poder calorífico superior (kcal/kg);

H = teor de hidrogênio (%)

## 6 RESULTADOS

### 6.1. Avaliação Geral dos Combustíveis

De acordo com o estudo realizado na empresa de calcinação, foi possível identificar a eficiência energética dos combustíveis (Quadro 2) a partir da equação 1 citada anteriormente, a quantidade de combustível necessária (Quadro 3) e o custo total com os combustíveis (Quadro 4) gasto para a produção de 1 ton de cal.

Quadro 2 - Relação de eficiência energética

<i>COMBUSTÍVEL</i>	<i>P.C.I. MÉDIO (Kcal)</i>	<i>PRODUÇÃO DE CAL (ton)</i>
<b>100 % Moinha de Carvão Vegetal (MCV)</b>	<b>7500</b>	<b>1</b>
<b>30 % Coque Verde de Petróleo com baixo teor de Enxofre (CVP) + 70 % Moinha de Carvão Vegetal (MCV)</b>	<b>8500</b>	
<b>20 % Casca de Café (CC) + 80 % Moinha de Carvão Vegetal (MCV)</b>	<b>3800</b>	

Para a produção de 1 ton de cal, o combustível 30 % de Coque Verde de Petróleo (CVP) com baixo teor de enxofre com 70 % Moinha de Carvão Vegetal (MCV) apresentou o maior poder calorífico inferior comparado aos outros combustíveis, o que nos mostra que até o momento é a melhor alternativa de combustível para geração de calor no processo de calcinação.

Quadro 3 – Relação de entrada de combustível

<i>COMBUSTÍVEL</i>	<i>ENTRADA (kg)</i>	<i>P.C.I. MÉDIO (Kcal)</i>	<i>PRODUÇÃO DE CAL (ton)</i>
<b>100 % Moinha de Carvão Vegetal (MCV)</b>	<b>207</b>	<b>7500</b>	<b>1</b>
<b>30 % Coque Verde de Petróleo com baixo teor de Enxofre (CVP) + 70 % Moinha de Carvão Vegetal (MCV)</b>	<b>222</b>	<b>8500</b>	
<b>20 % Casca de Café (CC) + 80 % Moinha de Carvão Vegetal (MCV)</b>	<b>243</b>	<b>3800</b>	

Os resultados identificados na tabela 2 mostra que a maior entrada de combustível foi 20 % Casca de Café (CC) com 80 % Moinha de Carvão Vegetal (MCV), sendo essa entrada de 243 kg para a produção de 1 ton de cal.

Quadro 4 – Relação de custo

<b>COMBUSTÍVEL</b>	<b>ENTRADA (ton)</b>	<b>PREÇO UNITÁRIO (ton)</b>	<b>CUSTO TOTAL (ton)</b>	<b>PRODUÇÃO DE CAL (ton)</b>
<b>100 % Moinha de Carvão Vegetal (MCV)</b>	<b>0,207</b>	<b>R\$ 250,00</b>	<b>R\$ 51,75</b>	<b>1</b>
<b>30 % Coque Verde de Petróleo com baixo teor de Enxofre (CVP) + 70 % Moinha de Carvão Vegetal (MCV)</b>	<b>0,222</b>	<b>R\$ 450,00</b>	<b>R\$ 99,90</b>	
<b>20 % Casca de Café (CC) + 80 % Moinha de Carvão Vegetal (MCV)</b>	<b>0,243</b>	<b>R\$ 150,00</b>	<b>R\$ 36,45</b>	

A partir dos resultados de custo apresentados na Tabela 3, percebe-se que para a produção de 1 ton de cal com o combustível 30 % de Coque Verde de Petróleo de baixo enxofre (CVP) com 70 % Moinha de Carvão Vegetal (MCV) apresenta o custo mais elevado (R\$ 99,90) e o combustível 20 % Casca de Café (CC) com 80 % Moinha de Carvão Vegetal (MCV) apresenta o custo mais baixo (R\$ 36,45).

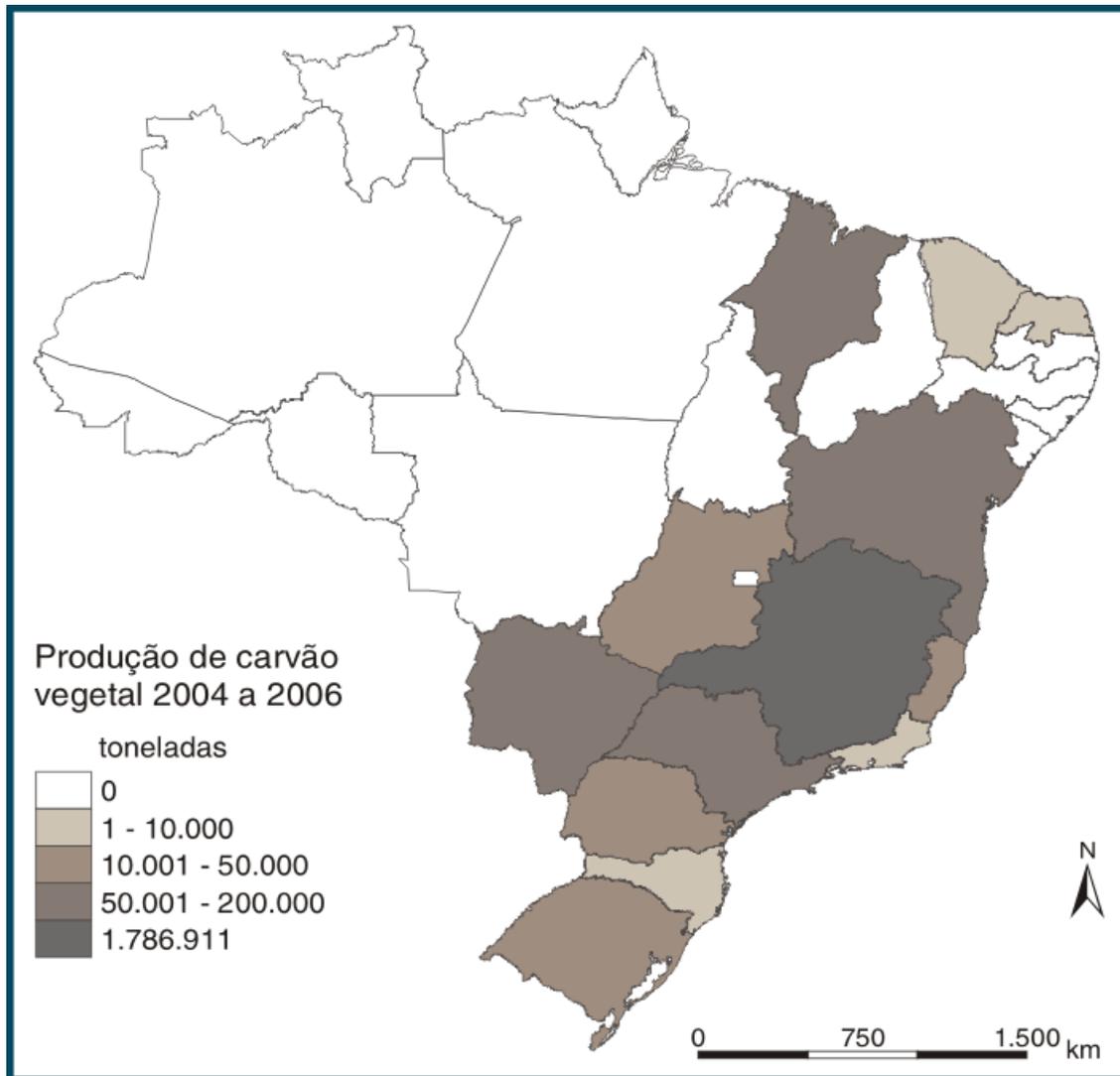
## 6.2. Disponibilidade de Matriz Energética

Como visto anteriormente, a matriz energética brasileira possui um enorme potencial no que tange a variedade de matrizes energéticas e potencial de crescimento para algumas fontes.

- A moinha de carvão vegetal (MCV) é encontrada em diversos estados, como Minas Gerais, São Paulo e além desses estados a figura 4 identifica outros estados produtores de carvão vegetal. Por ser encontrado em diversas cidades, principalmente em Minas gerais, fica fácil a aquisição desse produto, onde o mesmo é transportado pelo modal rodoviário, o que permite uma

entrega rápida. O custo médio da tonelada de moinha de carvão vegetal (MCV) é de R\$ 250,00.

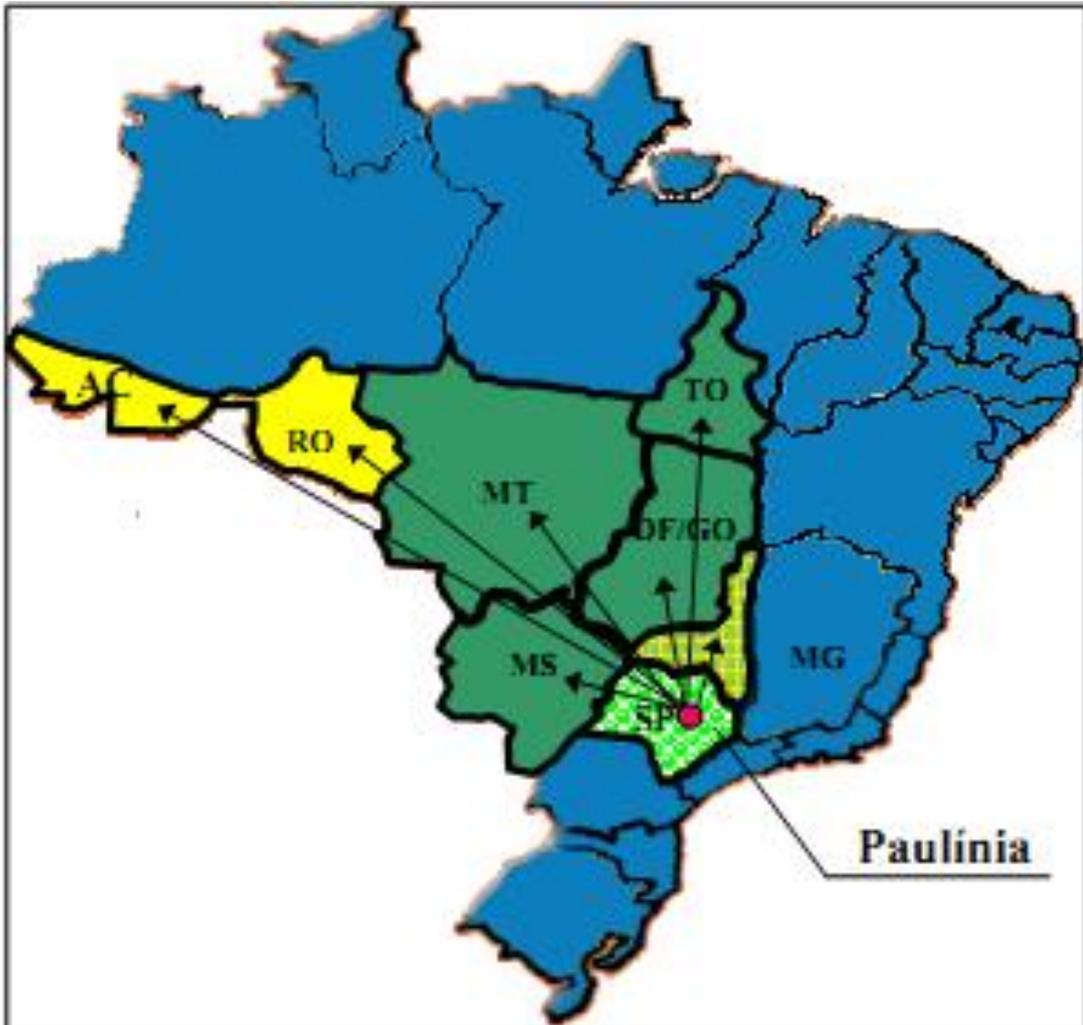
Figura 4 – Carvão vegetal no Brasil



Fonte: IBGE/Produção Agrícola Municipal.

- O coque verde de petróleo com baixo teor de enxofre (CVP) é encontrado apenas na cidade de Paulínea – SP, como demonstrado na figura 5, sendo fornecido pela Petrobrás por um preço de R\$ 450, 00.

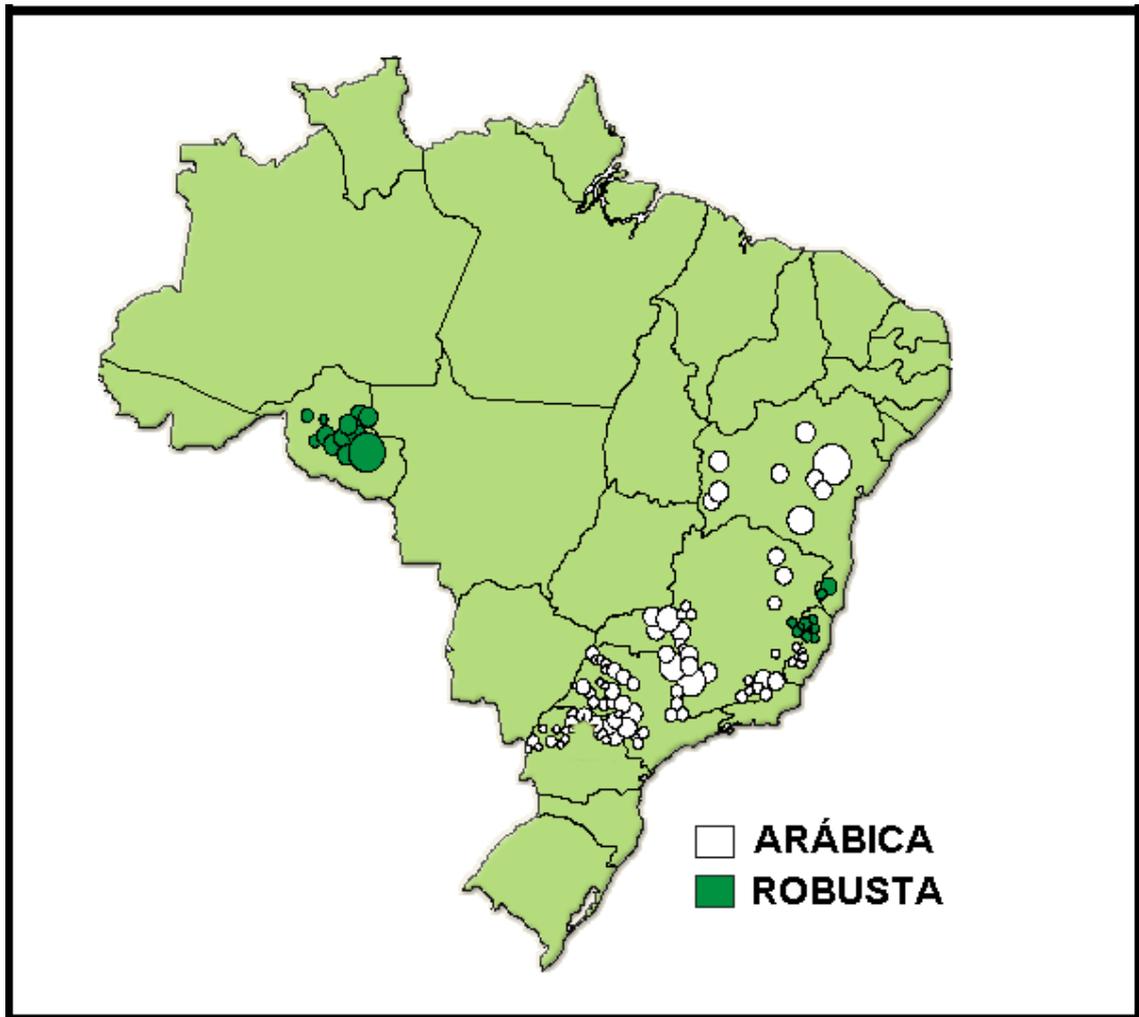
Figura 5 – Distribuição do coque verde de petróleo no Brasil



Fonte: [http://www.comitepcj.sp.gov.br/download/Replan-EIA\\_Item-5.pdf](http://www.comitepcj.sp.gov.br/download/Replan-EIA_Item-5.pdf)

- O Brasil por ser o principal produtor de café, sendo as áreas cafeeiras concentradas no centro-sul do país, como identificado na figura 6, com aproximadamente 2346,48 mil hectares de área plantada neste ano de 2012, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento - Conab, mais precisamente nas fazendas cafeeiras no sul de Minas Gerais onde foram plantadas 1218,9 mil hectares de café, torna se fácil adquirir a casca de café (CC), sendo que os meses de maio a agosto são os meses em que mais acontece a colheita de café. O custo médio da tonelada da casca de café é de R\$ 150,00.

Figura 6 – Áreas cafeeiras



Fonte: [http://www.cafepele.com.br/info/info\\_regioes\\_produutoras.htm](http://www.cafepele.com.br/info/info_regioes_produutoras.htm)

## 7 CONCLUSÃO

A partir da pesquisa realizada para confecção do presente trabalho, pode-se concluir que com a evolução histórica humana foram desenvolvidos diversos meios de se obter energia. Atualmente o respeito ao meio ambiente e a natureza tem sido um tema muito discutido, o que torna a busca por fontes renováveis e de baixos níveis poluentes. Entretanto a utilização de combustíveis em meios produtivos, mais precisamente em uma calcinação como citado neste trabalho, implica diretamente na realização do processo e na transformação da matéria prima em um produto final, buscando assim, utilizar um tipo de combustível mais viável economicamente.

Através dos resultados obtidos, analisando a eficiência energética dos combustíveis, a quantidade de combustível necessária, o custo total com os combustíveis e a disponibilidade de aquisição dos mesmos, foi possível observar que a mistura dos combustíveis 20 % Casca de Café (CC) com 80 % Moinha de Carvão Vegetal (MCV) embora forneceu um poder calorífico inferior (PCI) de 3800 kcal/kg, é o combustível que apresenta o menor custo total para a produção de 1 ton de cal e é, também, um combustível de fácil aquisição, pois como já foi ressaltado anteriormente o Brasil é um dos principais produtores de café. Logo, pode-se concluir que é mais viável na produção de cal utilizar a mistura dos combustíveis 20 % Casca de Café (CC) com 80 % Moinha de Carvão Vegetal (MCV).

## 8 REFERÊNCIAS

ANDRADE, M. M. de. **Introdução à metodologia do trabalho científico**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2003. 152 p.

Agência Nacional do Petróleo (ANP). **Anuário Estatístico – 2005**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/doc/anuario2005/T2.24.xls>. Acesso em 19 set. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTAS RENOVÁVEIS. **Consumo de carvão vegetal**: anuário estatístico. São Paulo, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6471**: Cal virgem e cal hidratada – Retirada e preparação de amostra – Procedimento. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE CAL (ABPC). **A cal e suas aplicações**. Disponível em: <<http://www.abpc.org.br/frame.htm>>. Acesso em 16 jun. 2012.

**Atlas de energia elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2ª ed. Brasília: ANEEL, 2005.

**Atlas de energia elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica. 3ª ed. Brasília: ANEEL, 2008.

BAJAY, S. V. ; SANT' ANA, P. H. DE M. **Oportunidades de eficiência energética para a indústria**: relatório setorial: cal e gesso. Brasília: CNI, 2010. 42 p.

BRAGA, B. et al. **Introdução à engenharia ambiental**: o desafio do desenvolvimento sustentável. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. 318 p.

BRITO, J. O. Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira. Documentos florestais, v. 9, p. 1 – 21, 1990b.

CAMARGO, M.; et al. **Produção de coque de petróleo e sua estratégia de negociação**. Anais XIII SIMPEP – Simpósio de Engenharia de Produção da Unesp – Bauru. São Paulo, 2006.

Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO), 2008. **Biomassa no Mundo**. Disponível em: <<http://cenbio.iee.usp.br/saibamais/mundo.htm>>. Acesso em: 29 mai. 2012.

Companhia cacique de café solúvel. Disponível em: <[http://www.cafepele.com.br/info/info\\_regioes\\_productoras.htm](http://www.cafepele.com.br/info/info_regioes_productoras.htm)>. Acesso em: 08 set. 2012.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de café safra 2012 segunda estimativa, maio/2012. Brasília: Conab, 2012.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. 1. ed. Campinas-SP: Unicamp, 2008. 736 p.

DYNAMIS, Mecânica aplicada Ltda. **Coque de petróleo: alternativa como insumo energético**. Disponível em: <<http://www.dynamismecanica.com.br/artigos.php>>. Acessado em 21 out. 2009.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 1999.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GOLDEMBERG, J. **Energia, meio ambiente & desenvolvimento**. São Paulo: Usp, 1998. 125 p.

GOLDEMBERG, J.; VILLANUEVA, L. D. **Energia, Meio & desenvolvimento**. São Paulo: Usp, 2003. 226 p.

GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Teoria da carbonização da madeira. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Manual CETEC: uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte, 1982.

JOSÉ, H. J. **Combustão e combustíveis**. Apostila Química Tecnológica Geral, Agosto 2004, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, Centro Tecnológico – CTC, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos – EQA, Laboratório de Energia e Meio Ambiente – LEMA.

MANO, E. B.;PACHECO, E. B. A. V.;BONELLI, C. M. C. **Meio ambiente, poluição e reciclagem**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005. 182 p.

MARQUES, M.; HADDAD, J.; MARINS, A. R. S. (Org.) **Conservação de energia: eficiência energética de instalações e equipamentos**. Itajubá: EFEI, 2001. 35 p.

MELLO, M. G. **Biomassa: energia dos trópicos em Minas Gerais**. Belo Horizonte: Labmídia, 2001.

NETTO, F. F. Estágio atual das pesquisas sobre o carvão vegetal. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL. Belo Horizonte: CETEC, 1980.

OLIVEIRA, J. B. & ALMEIDA, M. R. **Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, propriedades e controle de qualidade**. Belo Horizonte: CETEC, 1982.

PEDROSA, P. G. B. de M. **Desafios da regulação do setor elétrico, modicidade tarifária e atração de investimentos**. Brasília: ANEEL, 2005. 17 p.

PEREIRA, M. J. **Energia: eficiência e alternativas**. Rio de Janeiro, 2009. 197 p.

PETROBRÁS: caracterização do empreendimento. Disponível em: <[http://www.comitepcj.sp.gov.br/download/Replan-EIA\\_Item-5.pdf](http://www.comitepcj.sp.gov.br/download/Replan-EIA_Item-5.pdf)>. Acesso em: 08 set. 2012.

REIS, L. B. dos. **Geração de energia elétrica: tecnologia, inserção ambiental, planejamento, operação e análise de viabilidade**. 3. ed. Manole, 2003. 340 p.

REIS, L. B. dos; FADIGAS, E. A. A.;CARVALHO, C. E. **Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável**. 1.ed. São Paulo: Manole, 2005.415p.

REIS, L. B. dos; FADIGAS, E. A. A.; CARVALHO, C. E. **Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável**. 2.ed. São Paulo: Manole, 2012.447p.

REVISTA CAFEICULTURA. Briqueite é usado como fonte de energia sustentável. Disponível em: <<http://www.revistacafeicultura.com.br/index.php?tipo=ler&mat=46038&briqueite-e-usado-como-fonte-de-energia-sustentavel.html>>. Acesso em: 10 set. 2012.

REVISTA VEJA. Biomassa pode prover 20% da energia do mundo sem comprometer alimentação, dizem pesquisadores ingleses. Disponível em: <<http://veja.abril.com.br/noticia/ciencia/biomassa-pode-prover-20-da-energia-do-mundo-sem-comprometer-alimentacao-dizem-pesquisadores-ingleses>>. Acesso em: 29 maio 2012.

RICHARDSON, R. J. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1999.

ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY; ROTHMAN (Org.). **Uso da biomassa para produção de energia na indústria Brasileira**. São Paulo: Unicamp, 2005.

SALVADOR, S. **Reaction rates for the oxidation of highly sulphurised cokes: the influence of thermogravimetric conditions and some coke properties**. Fuel, vol. 82, pp. 715 – 720. 2003.

SILVEIRA, S.; REIS, L. B. dos; GALVÃO, L. C. R. A energia elétrica no âmbito do desenvolvimento sustentável. In: \_\_\_\_\_. **Energia elétrica para o desenvolvimento sustentável: introdução a uma visão multidisciplinar**. São Paulo: USP, 2000. cap. 1.

SOARES, B. D. **Estudo da produção de óxido de cálcio por calcinação do calcário: caracterização dos sólidos, decomposição térmica e otimização paramétrica**. 2007. 383 p.

SPEIGHT, J. G. New approaches to hydroprocessing. Catalysis today, article im press. 2004.

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. da. Perspectiva do setor de biomassa de madeira para a geração de energia. **BNDES Setorial 33**, Rio de Janeiro, 2011, p. 261-314, mar. 2011.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Visoça: SIV, 1984. 21 p. (Boletim Técnico, 1).

WALISIEWICZ, M. **Energia alternativa: solar, eólica, hidrelétrica e de biocombustíveis**. São Paulo: Publifolha, 2008. 72 p.