



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
EDIVALDO SOBRINHO VELHO

**DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO A PARTIR DOS
REJEITOS ULTRAFINOS DE CARVÃO MINERAL E REJEITOS INDUSTRIAIS**

Tubarão, SC
2018



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
EDIVALDO SOBRINHO VELHO

**DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO A PARTIR DOS
REJEITOS ULTRAFINOS DE CARVÃO MINERAL E REJEITOS INDUSTRIAIS**

Relatório Técnico/Científico apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Prof. Dr. Eng. Jonathan Alexsander Bork. (Orientador)

Tubarão

2018

EDIVALDO SOBRINHO VELHO

**DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO A PARTIR DOS
REJEITOS ULTRAFINOS DE CARVÃO MINERAL E REJEITOS INDUSTRIAIS**

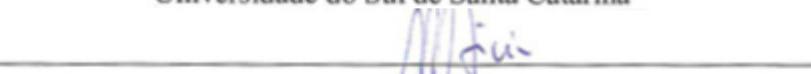
Este relatório técnico/científico foi julgado adequado à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Química da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Tubarão, 18 de junho de 2018.



Professor Eng. Jonathan Alexsander Bork, Dr. (Orientador)

Universidade do Sul de Santa Catarina



Professora Eng. Maria Lúcia Soares Cochlar, MSc. (Avaliadora)

Universidade do Sul de Santa Catarina



Professor Alessandro Oliveira Limas (Avaliador)

Universidade do Sul de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus avós,
que sempre me apoiaram e me ajudaram em
todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

A minha família, em especial aos meus pais pelo apoio e incentivo em todos os momentos.

Aos meus colegas de curso, em especial meu amigo Felipe pela amizade e companheirismo em todos os momentos dessa caminhada.

A minha namorada, pelo apoio e compreensão em todos os momentos difíceis e bons.

Ao professor e amigo Jonathan Alexander Bork pela orientação neste trabalho e pelo auxílio e compreensão em vários outros momentos que precisei durante o curso.

A todos os professores do curso, pelo ensinamento e dedicação.

A Indústria Carbonífera Rio Deserto, pela oportunidade de trabalho em todos esses anos e pela realização do estágio.

E, por fim, a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

“Um dos maiores problemas não estão nos obstáculos, mas na escolha da direção errada” (Augusto Cury).

RESUMO

A utilização de resíduos e rejeitos dos processos produtivos tem sido muito pesquisada como forma de minimizar o impacto ambiental gerado pela indústria. O mesmo ocorre com a mineração de carvão no sul do Estado de Santa Catarina, que vem buscando tornar sua atividade cada vez mais sustentável ambientalmente. O presente estudo teve por objetivo desenvolver um combustível utilizando os rejeitos ultrafinos de carvão mineral gerado no processo de beneficiamento da empresa investigada associado a outros materiais combustíveis para melhorar sua qualidade, tendo como base os parâmetros estabelecidos nas usinas termelétricas do complexo Jorge Lacerda. Para a preparação do combustível foi utilizado o Misturador Intensivo/Granulador EIRICH, com o propósito de produzir uma mistura combustível aparentemente homogênea e granular. O processo de mistura e granulação foi feito com nove composições diferentes, que foram selecionadas de acordo com a qualidade esperada. Das nove misturas, apenas na mistura 2 não houve a granulação no equipamento. Foi realizado um teste com a mistura granular composta por 73% de rejeito ultrafino de carvão e 27% de biomassa de madeira em uma caldeira de leito fluidizado tipo borbulhante de uma cerâmica fabricante de telhas e pisos. Através do monitoramento das temperaturas do fundo do leito e da parte superior, bem como a temperatura do secador que é alimentado pelo calor da caldeira, pôde-se concluir que a mistura combustível tem capacidade de substituir o combustível utilizado originalmente nessa caldeira, demonstrando que é possível desenvolver um combustível alternativo a partir do rejeito ultrafino de carvão associado a outros materiais combustíveis.

Palavras-chave: Rejeitos. Carvão. Combustível.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Mineração pelo método de câmaras e pilares (<i>room and pillar</i>)..... | 14 |
| Figura 2 – Esquema de produção de energia elétrica a partir do carvão mineral..... | 19 |
| Figura 3 – Oferta de potência de energia elétrica no Brasil em 2016. | 20 |
| Figura 4 – Evolução do consumo aparente e produção de biomassa de origem florestal no Brasil..... | 23 |
| Figura 5 – Localização e área plantada com <i>Pinus</i> e <i>Eucalyptus</i> no Brasil em 2014. | 25 |
| Figura 6 – Fluxograma de produção e aplicação do coque verde de petróleo..... | 26 |
| Figura 7 – Coque verde. | 26 |
| Figura 8 – Misturador intensivo/granulador..... | 30 |
| Figura 9 – Materiais depositados dentro da cuba do granulador..... | 30 |
| Figura 10 – Carregamento (A), abastecimento (B) e alimentação da mistura na caldeira (C). 32 | |
| Figura 11 – Mistura 2. | 37 |
| Figura 12 – Mistura 3. | 38 |
| Figura 13 – Mistura 4. | 39 |
| Figura 14 – Mistura 5. | 40 |
| Figura 15 – Mistura 6. | 41 |
| Figura 16 – Mistura 7. | 42 |
| Figura 17 – Mistura 8..... | 43 |
| Figura 18 – Mistura 9..... | 44 |
| Figura 19 – Indicadores de temperatura antes do teste (A), 15 minutos após o início (B) e no final do teste..... | 46 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Relação dos testes realizados | 31 |
| Tabela 2 – Quantidade mensal disponível dos materiais selecionados | 34 |
| Tabela 3 – Caracterização dos materiais selecionados | 34 |
| Tabela 4 - Etapas da mistura e granulação | 35 |
| Tabela 5 – Mistura 1 | 36 |
| Tabela 6 – Mistura 2 | 37 |
| Tabela 7 – Mistura 3 | 38 |
| Tabela 8 – Mistura 4 | 39 |
| Tabela 9 – Mistura 5 | 40 |
| Tabela 10 – Mistura 6 | 41 |
| Tabela 11 – Mistura 7 | 42 |
| Tabela 12 – Mistura 8 | 43 |
| Tabela 13 – Mistura 9 | 44 |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 11 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA E PROBLEMA | 11 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 12 |
| 1.2.1 | Objetivo Geral | 12 |
| 1.2.1.1 | Objetivos específicos..... | 12 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 13 |
| 2.1 | CARVÃO MINERAL | 13 |
| 2.1.1 | Formação do carvão..... | 13 |
| 2.1.2 | Extração e beneficiamento..... | 14 |
| 2.1.2.1 | Beneficiamento de ultrafinos de carvão. | 16 |
| 2.1.2.2 | Beneficiamento de finos de carvão..... | 16 |
| 2.1.2.3 | Beneficiamento de grossos de carvão..... | 17 |
| 2.1.3 | Análise química e física do carvão | 17 |
| 2.1.3.1 | Poder calorífico superior (PCS)..... | 17 |
| 2.1.3.2 | Teor de cinzas..... | 18 |
| 2.1.3.3 | Teor de voláteis | 18 |
| 2.1.3.4 | Teor de enxofre..... | 18 |
| 2.1.4 | Carvão mineral no Brasil e no mundo | 18 |
| 2.1.5 | Impactos ambientais | 20 |
| 2.2 | BIOMASSA..... | 21 |
| 2.2.1 | Considerações iniciais | 21 |
| 2.2.2 | Biomassa como fonte de energia | 22 |
| 2.2.2.1 | Carvão vegetal | 24 |
| 2.2.3 | Fontes de biomassa..... | 24 |
| 2.3 | COQUE VERDE DE PETRÓLEO..... | 25 |
| 2.4 | CO-COMBUSTÃO..... | 27 |
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS | 28 |
| 3.1 | TIPO DE PESQUISA | 28 |
| 3.2 | DESCRIÇÃO DO PROCESSO | 28 |
| 3.2.1 | Identificação dos materiais combustíveis disponíveis no mercado..... | 28 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 3.2.2 | Caracterização dos materiais selecionados | 29 |
| 3.2.3 | Definição das misturas combustíveis | 29 |
| 3.2.4 | Teste industrial | 31 |
| 3.3 | ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 33 |
| 3.3.1 | Materiais combustíveis disponíveis no mercado | 33 |
| 3.3.2 | Caracterização dos materiais selecionados | 34 |
| 3.3.3 | Testes de granulação das misturas combustíveis selecionadas | 35 |
| 3.3.3.1 | Mistura 1 | 36 |
| 3.3.3.2 | Mistura 2 | 37 |
| 3.3.3.3 | Mistura 3 | 38 |
| 3.3.3.4 | Mistura 4 | 39 |
| 3.3.3.5 | Mistura 5 | 40 |
| 3.3.3.6 | Mistura 6 | 41 |
| 3.3.3.7 | Mistura 7 | 42 |
| 3.3.3.8 | Mistura 8 | 43 |
| 3.3.3.9 | Mistura 9 | 44 |
| 3.3.4 | Teste em caldeira de leito fluidizado | 45 |
| 4 | CONCLUSÃO | 47 |
| | REFERÊNCIAS | 49 |

1 INTRODUÇÃO

A exploração do carvão mineral no sul do estado de Santa Catarina tem sido uma atividade importante para a economia da região. Porém, os processos de mineração e beneficiamento do carvão causaram uma série de impactos negativos no meio ambiente que podem ser percebidos até os dias de hoje.

Um dos maiores desafios na indústria atual é fazer com que suas atividades se tornem cada vez mais sustentáveis do ponto de vista ambiental. Por isso, a utilização de resíduos e rejeitos dos processos produtivos tem sido muito pesquisada como forma de minimizar o impacto ambiental.

Este estudo tem como proposta avaliar a possibilidade de produção de combustíveis utilizando rejeitos ultrafinos de carvão mineral gerados no processo de beneficiamento, através da mistura com outros materiais combustíveis, tendo como base os parâmetros estabelecidos pelas usinas termelétricas do complexo Jorge Lacerda.

1.1 JUSTIFICATIVA E PROBLEMA

A preocupação com as questões ambientais é de fundamental importância para a sobrevivência de uma empresa. Assim, a manifestação da sociedade, o aumento da fiscalização dos órgãos ambientais e o enrijecimento da legislação têm pressionado para que as companhias busquem tornar seus processos e produtos cada vez mais sustentáveis ambientalmente.

A extração de carvão mineral movimenta há décadas a economia do sul do Estado de Santa Catarina e ainda hoje continua entre as lideranças das cadeias produtivas da região. Entretanto, durante muito tempo a mineração de carvão executou seu negócio sem o gerenciamento adequado dos impactos ambientais causados durante suas atividades, o que acarretou diversos problemas ambientais que podem ser observados até hoje.

Além da mineração de carvão, diversos segmentos da indústria geram quantidades significativas de resíduos, os quais caso não sejam controlados de forma adequada, ocasionam impactos ambientais negativos no meio ambiente. Por isso é necessário que o controle seja feito desde a geração até a destinação final. Entretanto, muitos resíduos industriais podem ser utilizados como fonte de combustível, bem como os rejeitos da mineração de carvão.

Esta investigação objetiva encontrar alternativas para reduzir a expressiva quantidade de rejeito de carvão mineral enviada diariamente para o depósito na empresa

estudada, através da produção de um combustível alternativo, buscando combinar este rejeito com outros resíduos combustíveis disponíveis, de forma que essas misturas formem um combustível com potencial energético que possa ser explorado.

Os descritos anteriores permitem determinar a seguinte questão para investigação: **É possível desenvolver um combustível alternativo a partir da associação dos rejeitos ultrafinos de carvão mineral gerados no beneficiamento de uma mineradora do sul catarinense a outros resíduos industriais e materiais combustíveis, tendo como base os parâmetros utilizados nas usinas termelétricas do complexo Jorge Lacerda?** Em estudo realizado no ano de 2018 na cidade de Tubarão/SC.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a possibilidade de produção de uma mistura combustível utilizando rejeitos ultrafinos de carvão mineral e outros rejeitos combustíveis baseando-se nos parâmetros estabelecidos nas usinas termelétricas do complexo Jorge Lacerda, buscando contribuir para com a sustentabilidade ambiental.

1.2.1.1 Objetivos específicos

- a) Identificar os materiais disponíveis para a composição do combustível;
- b) Realizar a caracterização físico-química dos materiais selecionados;
- c) Definir a proporção dos materiais selecionados na mistura para compor o combustível;
- d) Avaliar o equipamento utilizado na produção do combustível;
- e) Realizar um teste da mistura combustível em uma caldeira industrial.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARVÃO MINERAL

2.1.1 Formação do carvão

O carvão é uma rocha sedimentar combustível, formada de tecidos lenhosos e celulose, ceras, algas, resinas, esporos, hidrocarbonetos, gel, betume, entre outros, de material heterogêneo, originados de vegetais depositados sob a água. Dessa forma, livre da ação do oxigênio presente no ar, esses vegetais sofreram decomposição parcial, seguida de ação de bactérias e da pressão das camadas sobrepostas e do calor. (RIGOTTI, 2002).

A matéria vegetal que dá origem ao carvão foi depositada em águas pouco profundas. Uma camada de carvão para ter aproveitamento econômico deve ser espessa e para isso a bacia de deposição precisa sofrer rebaixamento lento de modo que a lâmina d'água mantém-se mais ou menos constante, de maneira que ao ocorrer o depósito dos restos vegetais a bacia não fique assoreada. Então, muito provavelmente, esses locais de acumulação de matéria vegetal foram no passado grandes extensões pantanosas, formando lagos ou lagunas com vegetal. (id *ibid*).

A transformação da matéria vegetal em carvão acontece através das etapas de turfa, seguida do lignito e depois o carvão ou hulha. A hulheização ocorre em função do tempo, temperatura e pressão e é constituída principalmente no aumento do teor de carbono fixo e diminuição do teor de hidrogênio e oxigênio que são segregados na forma de água ou hidrocarbonetos. (id *ibid*).

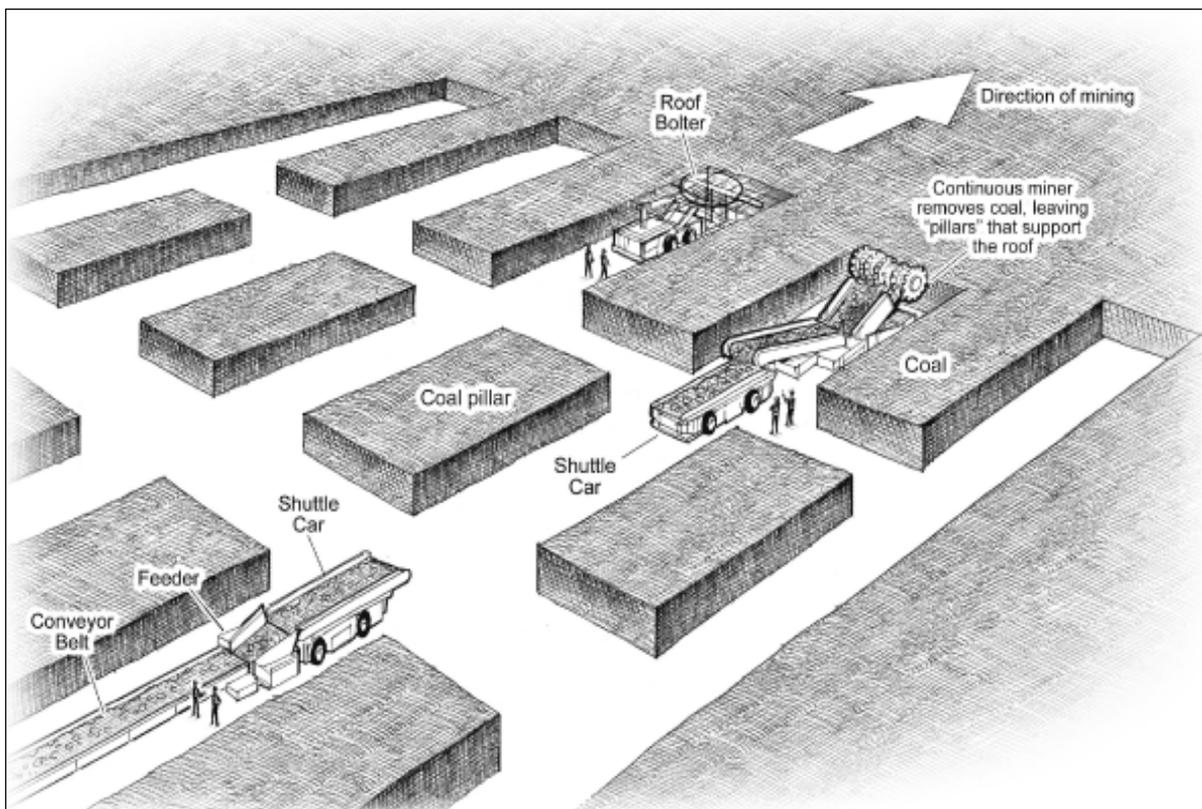
A turfa é um dos primeiros estágios do carvão, com baixo teor de carbono, em torno de 45%; o lignito possui conteúdo carbonífero entre 60% e 75%; a hulha ou carvão betuminoso é o mais utilizado como combustível e contém entre 75% e 85% de carbono, já o antracito, o mais puro dos carvões, apresenta um conteúdo carbonífero acima de 90%. (ANEEL, 2014).

O carvão é encontrado associado a folhelhos, siltitos e arenitos originados da Formação Rio Bonito da idade permiana. A lavra pode ser desenvolvida a céu aberto ou subsolo, dependendo das condições geológicas locais. Em Santa Catarina, os principais trabalhos ocorrem em lavras subterrâneas. (COSTA; KOPPE, 2008).

2.1.2 Extração e beneficiamento

No Brasil, atualmente, a mineração de carvão em subsolo é desenvolvida através do método de câmaras e pilares (*room and pillar*), que consiste na exploração das camadas horizontais ou levemente inclinadas na qual o teto é sustentado por pilares naturais (Figura 1). A extração do minério é feita a partir de câmaras retangulares, na qual são deixadas partes do carvão entre as câmaras como pilares para a sustentação do teto da mina. O principal objetivo é extrair a maior quantidade de carvão mantendo a segurança dos trabalhos. As dimensões dos pilares dependem de fatores como a espessura do depósito, a profundidade, a estabilidade do teto e resistência do pilar. (COSTA; KOPPE, 2008).

Figura 1 – Mineração pelo método de câmaras e pilares (*room and pillar*).



Fonte: United States Securities and Exchange Commission (2007, p. 45).

A lavra subterrânea pode ser realizada através do desmonte por explosivos (furação e detonação) ou equipamentos mecânicos, como os mineradores contínuos, transporte/carregamento e escoramento do teto com uso de parafusos. Os sistemas

mecanizados reduzem o número de operações unitárias de lavra aumentando a produtividade. (COSTA; KOPPE, 2008).

Geralmente, o material orgânico está associado a outros materiais inorgânicos (argilas, pirita e algumas vezes carbonatos). As argilas são responsáveis pela maior parte das cinzas geradas na queima do carvão, já a pirita é a responsável pelo teor de enxofre. Essa fração inorgânica é prejudicial ao processo e ao meio ambiente e por isso precisa ser separada e esse processo é chamado de beneficiamento. (SAMPAIO, 2002).

A classificação do carvão mineral ocorre conforme seu *rank* e *grade*. O *rank* indica o grau de carbonização atingido pelo carvão durante seu metamorfismo e o *grade* a quantidade de matéria inorgânica existente no carvão. O valor comercial do carvão é resultado da combinação de alguns fatores como: poder calorífico, teor de cinzas, granulometria, teor de enxofre e material volátil. (GUERRA, 2000).

A primeira etapa do processo de beneficiamento é a britagem. Como resultado, o produto da britagem de carvões gera uma quantidade significativa de finos. Essa presença de finos é inevitável e pode causar sérios problemas (contaminação de águas e solos, geração de poeiras, perdas) e, portanto, deve ser tratada através da utilização de tecnologia adequada. (CHAVES, 2008).

Na próxima etapa acontece a separação baseada na granulometria das partículas através do peneiramento. Após a classificação, o material é encaminhado conforme sua granulometria para os variados métodos utilizados no beneficiamento mineral como jiges, meio denso, espirais, mesas concentradoras, flotação. (REDIVO, 2002).

Resumidamente, o processo de beneficiamento de carvão mineral depende principalmente de dois aspectos: a granulometria e suas características físico-químicas. A partir da caracterização do material conforme estes aspectos são selecionados os diferentes métodos e equipamentos necessários para sua concentração. (REDIVO, 2002).

De acordo com Sampaio (2002), o beneficiamento de carvão é classificado conforme a granulometria do material:

- Beneficiamento de ultrafinos de carvão (material com granulometria inferior a 0,1 mm);
- Beneficiamento de finos de carvão (material com granulometria entre 0,1 e 2 mm);
- Beneficiamento de grossos de carvão (material com granulometria entre 2 e 50 mm);

- Beneficiamento de grosseiros de carvão (material com granulometria maior que 50 mm).

2.1.2.1 Beneficiamento de ultrafinos de carvão.

O processo mais utilizado no beneficiamento de ultrafinos é a flotação devido à granulometria fina. Este método é baseado em físico-química de superfície através das propriedades hidrofóbicas e hidrolíticas dos carvões e impurezas associadas a ele. Apesar de muito eficiente, muitas vezes a flotação não é utilizada por causa dos custos operacionais elevados. (SAMPAIO, 2002).

Resumidamente, o processo de flotação consiste em fazer com que a polpa composta por minério e água passe por um fluxo de bolhas de ar. Geralmente é acrescentado um espumante para tornar as bolhas de ar mais estáveis, com isso as partículas hidrofóbicas se aderem às bolhas de ar e flutuam e são posteriormente removidas da suspensão. As partículas hidrofílicas permanecem na polpa. Dessa forma, ocorre a separação dos materiais hidrofóbicos (carvão) dos hidrofílicos (argilas). (RUIZ, 2009).

2.1.2.2 Beneficiamento de finos de carvão

As mesas concentradoras, as espirais concentradoras e os ciclones autógenos são os equipamentos mais utilizados no beneficiamento de finos de carvão. (SAMPAIO, 2002).

As mesas concentradoras são levemente inclinadas em direção a um longo eixo horizontal menor e seu movimento ocorre na direção do eixo maior com diferentes acelerações. Sua superfície é plana, geralmente de forma retangular e parcialmente coberta com rifles. As espirais são formadas por uma hélice espiral, onde as partículas leves são separadas das pesadas em diferentes correntes que são removidas separadamente. A polpa de carvão é adicionada na parte superior e ao percorrer a espiral as argilas (partículas mais pesadas) permanecem próximo ao eixo da espiral, na zona de velocidade mais baixa e os carvões (mais leves) se concentram nas zonas de velocidades mais altas. Já os ciclones caracterizam-se por uma secção cilíndrica sobreposta a uma secção cônica. A alimentação é tangencial e sob pressão na parte cilíndrica do cone. A força centrífuga criada pelo movimento rotacional faz com que ocorra a separação por densidade, sendo que as partículas

mais densas se concentram na parede do ciclone, enquanto as menos densas são descarregadas na parte superior e conduzidas por uma corrente de ar. (SAMPAIO, 2002).

2.1.2.3 Beneficiamento de grossos de carvão

A jigagem é um processo bastante utilizado para o beneficiamento dos grossos de carvão. No jigue a separação ocorre através de pulsações transferidas para uma polpa de carvão onde acontece a separação das partículas mais pesadas, sendo que as partículas mais leves (carvão) são retiradas na parte superior e as mais pesadas (argilas) na inferior. (REDIVO, 2002).

A separação por meio denso é outro método bastante utilizado atualmente. O meio denso é formado através da utilização de finos de magnetita em água. Esse processo baseia-se também na diferença de densidade entre o carvão e as argilas, assim, ao ser introduzido no meio denso, o carvão flutua e os rejeitos/argilas afundam. (REDIVO, 2002).

2.1.3 Análise química e física do carvão

A análise elementar do carvão determina o calor gerado na sua combustão, indicando a qualidade dele como combustível. A composição química e o teor de cinzas, a fusibilidade e a matéria volátil influenciam na utilização ou não do carvão em um determinado processo industrial. (DNPM, 1999).

2.1.3.1 Poder calorífico superior (PCS)

O poder calorífico é provavelmente a característica mais importante do carvão como combustível, já que reflete seu teor energético e pode ser definido pela quantidade de calor liberado pela combustão de uma unidade de massa em uma bomba calorimétrica, com oxigênio a volume constante, geralmente expressa em kcal/kg. (ABNT, 1984).

2.1.3.2 Teor de cinzas

O teor de cinzas é a quantidade percentual de resíduo mineral que permanece após a queima dos componentes orgânicos combustíveis e oxidação dos inorgânicos. (ABNT, 1983).

2.1.3.3 Teor de voláteis

Outro fator muito observado referente à qualidade do carvão como combustível é o teor de voláteis, que corresponde ao produto que se desprende na forma de gás ou vapor (com exceção da umidade). O método para determinação do teor de volátil difere de acordo com a natureza de cada material analisado. (ABNT NBR 8297/1983).

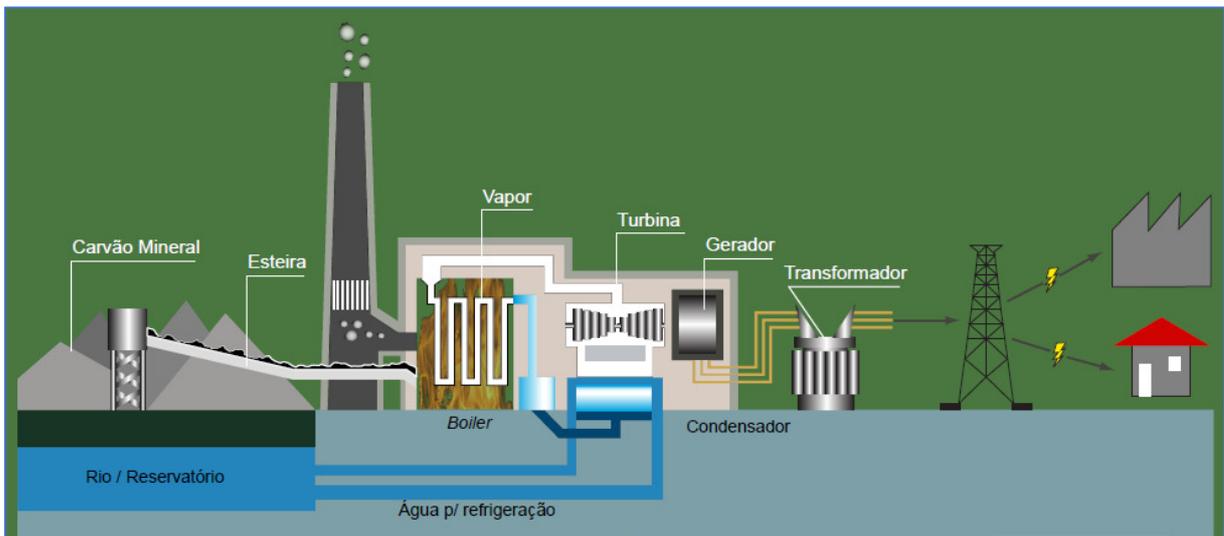
2.1.3.4 Teor de enxofre

O enxofre é indesejado no carvão como combustível. Assim, a determinação do teor de enxofre é fundamental para decidir os processos de beneficiamento do carvão, calcular a quantidade de SO_x emitido pela queima do combustível, bem como estimar o potencial poluidor dos rejeitos gerados nesse processo e estabelecer os controles necessários para sua deposição final adequada. (ABNT NBR 8297/1983).

2.1.4 Carvão mineral no Brasil e no mundo

O carvão mineral é o combustível fóssil com maior disponibilidade no mundo. Com as reservas conhecidas atualmente é possível manter sua produção por mais 130 anos e é encontrado em quantidades importantes em 75 países como os Estados Unidos, Rússia e China, que juntos somam mais de 60% das reservas mundiais deste minério. Ainda hoje, o carvão mineral é a fonte energética utilizada em maior quantidade no mundo para geração de energia elétrica, com participação de 41%. (ANEEL, 2008).

Figura 2 – Esquema de produção de energia elétrica a partir do carvão mineral.



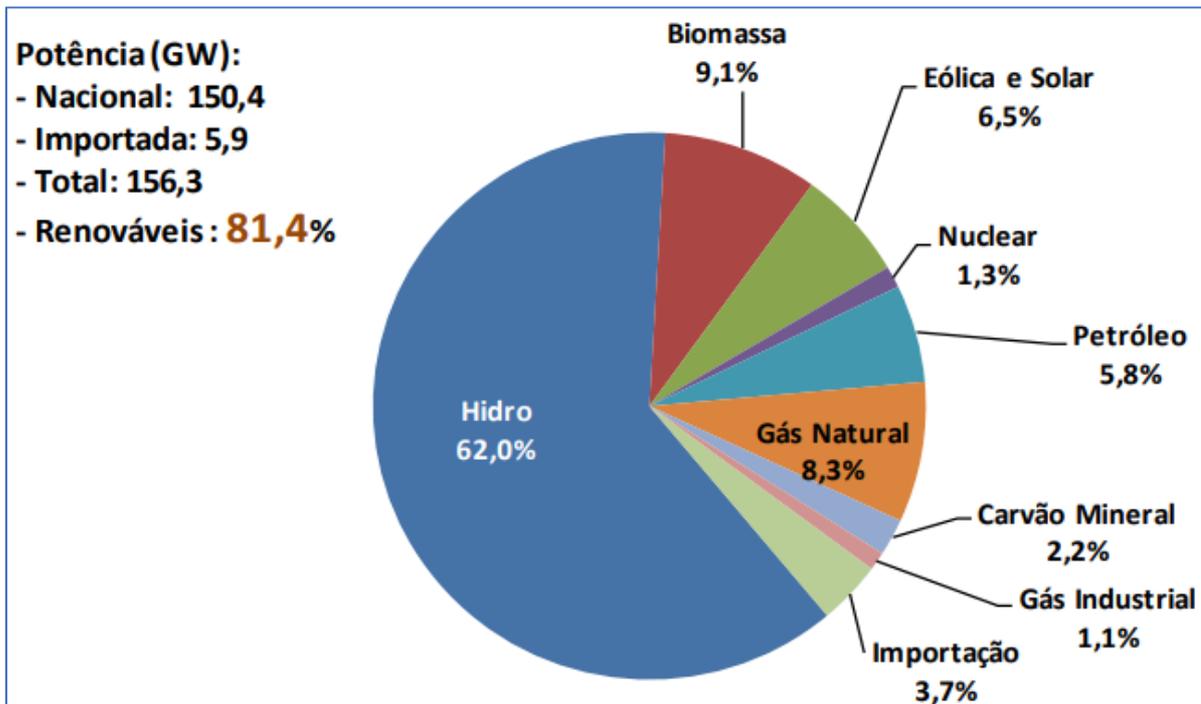
Fonte: ANEEL (2008, p. 130).

A matriz energética brasileira é predominantemente renovável, não havendo a mesma participação do carvão como em outros países. O carvão mineral no país é produzido apenas na região sul, principalmente no estado do Rio Grande do Sul e sudeste de Santa Catarina, com exceção de somente uma mina no Paraná. (CHAVES, 2008).

Nos anos de 2013 a 2016 houve acréscimo na geração de energia elétrica a partir do carvão no Brasil, revertendo a tendência de queda que vinha ocorrendo até 2012. Os aumentos sucessivos da capacidade instalada a carvão e a baixa quantidade de chuvas nos últimos anos ocasionaram uma maior geração de energia por esta fonte. (MME, 2017).

A Figura 3 ilustra a oferta de potência de energia elétrica no Brasil no ano de 2016, no qual pode ser observada a importância da potência hidráulica, com 62% de participação. As fontes renováveis somaram 81,4%, muito acima do indicador mundial, que é de 20%. A participação de carvão mineral é de somente 2,2%. (MME, 2017).

Figura 3 – Oferta de potência de energia elétrica no Brasil em 2016.



Fonte: MME (2017, p. 10).

2.1.5 Impactos ambientais

O carvão é uma forma de produção de energia bastante agressiva ao meio ambiente. Mesmo gerando grandes benefícios econômicos, os processos de extração, beneficiamento e combustão causam impactos ambientais significativos. (ANEEL, 2014).

Mesmo utilizando as técnicas mais avançadas existentes para a mineração de carvão, muitos dos procedimentos necessários para a abertura de uma mina como o decapeamento, abertura de plano inclinado e poços de ventilação acabam gerando impactos ambientais inevitáveis. (KOPEZINSKI, 2000).

Em Santa Catarina é onde existe o maior número de empresas carboníferas do país e elas operam principalmente nas camadas Barro Branco e Bonito. Do total extraído do subsolo, geralmente de 40 a 70% são rejeitos compostos por matéria carbonosa, pirita, argilas, etc. Estima-se que existam aproximadamente 200 milhões de toneladas de rejeitos que fazem parte do passivo ambiental da região carbonífera catarinense. (MENEZES, 2009).

Existe uma grande variedade de técnicas de beneficiamento de acordo com o tipo do minério e sua utilização prevista e geralmente são utilizados aditivos químicos,

tratamentos mecânicos e também a queima de combustíveis que afetam direta ou indiretamente o meio ambiente. (KOPEZINSKI, 2000).

Além da exposição de grandes volumes de pirita causada pelo processo de lavra e beneficiamento, a mineração de carvão gera uma grande quantidade de rejeitos que são depositados em pilhas ou barragens. Os depósitos de rejeitos são ricos em sulfetos, tornando-se fontes de geração de drenagem ácida de mina (DAM), com concentração elevada de metais. (SILVA, 2010).

A lavra subterrânea é menos impactante em relação à área abrangida quando comparada com a lavra a céu aberto. Porém, impactos como a subsidência de terrenos, vibrações devido à detonação de explosivos e disposição de rejeitos na superfície também são associados à lavra subterrânea. (COSTA; KOPPE, 2002).

A DAM é o maior problema ambiental da região carbonífera catarinense, principalmente pela gravidade da contaminação das águas e solos. Ela resulta, em sua maior parte, da oxidação da pirita e também da presença de outros sulfetos. A solução gerada é extremamente ácida (com pH inferior a 2,0) e com altos teores de ferro, alumínio e metais pesados como manganês, cádmio, entre outros. (SILVA, 2010).

Atualmente, diferente da forma como era realizado nas décadas passadas, observa-se que a mineração de carvão vem apresentando um grande avanço em relação ao controle de seus impactos ambientais, preservação e recuperação ambiental das áreas degradadas pelas empresas mineradoras de carvão. (COSTA; KOPPE, 2002).

2.2 BIOMASSA

2.2.1 Considerações iniciais

Com a utilização do carvão como fonte de energia e posteriormente com o crescimento constante do gás natural e do petróleo, a biomassa começou a perder sua liderança histórica, sendo usada praticamente em residências particulares em regiões agrícolas. Contudo, atualmente a maioria dos países tem buscado investir em fontes alternativas de energia, principalmente renováveis, de forma a reduzir a participação do uso de derivados de petróleo, diminuindo por consequência a dependência em relação aos países exportadores de petróleo. (CORTEZ; LORA; GOMES, 2008).

Uma das fontes de produção de energia que possui maior potencial para crescimento em todo o mundo é a biomassa. Por isso é considerada como uma das principais fontes de energia alternativa para reduzir a dependência dos combustíveis fósseis. Além da energia elétrica, a partir da biomassa também podem ser produzidos biocombustíveis como o biodiesel e o etanol. (ANEEL, 2008).

A biomassa pode ser definida como a fração biodegradável de materiais de origem biológica provenientes da agricultura, seja de origem animal ou vegetal, da exploração florestal, bem como indústria de processamento de madeira e fração biodegradável de resíduos urbanos e industriais. (OLIVEIRA, 2015).

2.2.2 Biomassa como fonte de energia

Pode ser classificada como biomassa toda matéria orgânica que pode ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica. É classificada conforme sua origem como: florestal (principalmente madeira), agrícola (cana-de-açúcar, soja, arroz) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos e líquidos). (ANEEL, 2008).

A transformação da biomassa em energia depende de sua origem, sendo que existem inúmeras tecnologias sendo aplicadas atualmente em todo o mundo. Porém, a utilização de biomassa para fins energéticos, independente da tecnologia aplicada, possui dois problemas principais: o custo e a eficiência energética de toda sua cadeia produtiva. (CORTEZ; LORA; GOMES, 2008).

Para ser utilizada na geração de eletricidade, a biomassa precisa passar por um processo de transformação, que pode ser termoquímico, bioquímico e físico-químico, em um produto intermediário. Ela pode ser transformada em tipos de biocombustíveis sólidos, líquidos ou gasosos que posteriormente são convertidos em energia térmica, mecânica ou elétrica. (OLIVEIRA, 2015).

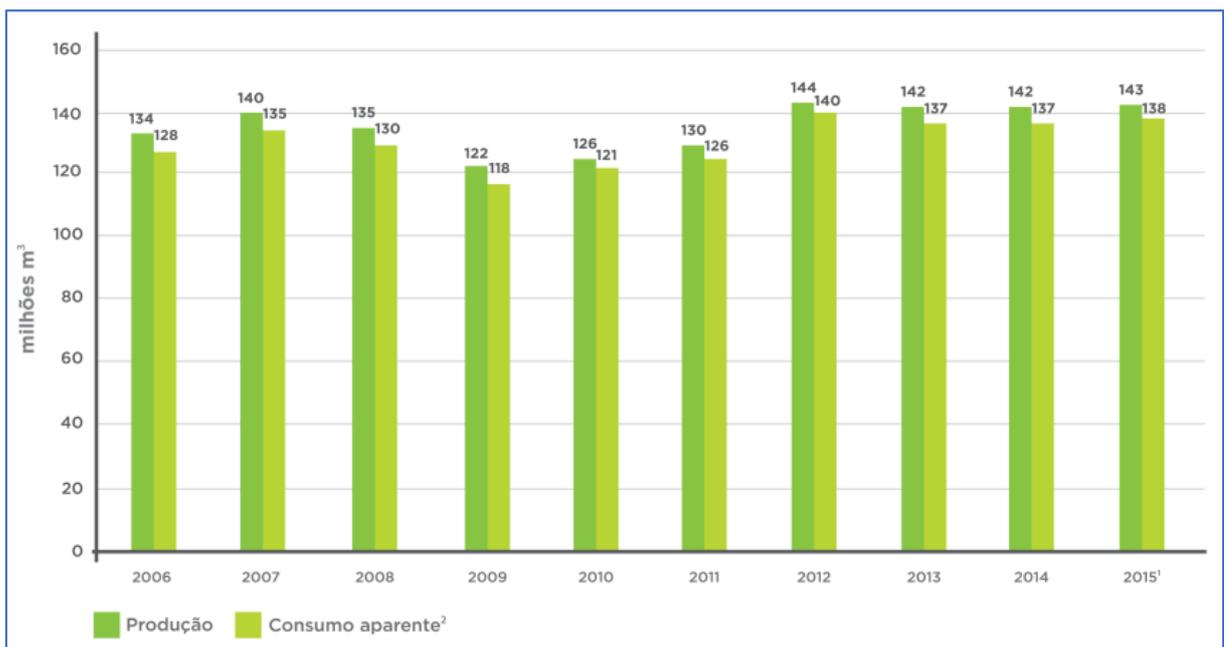
Cada técnica utilizada para transformar a matéria-prima em energia dá origem a um derivado diferente e também atinge um ponto de vista ecológico distinto. A combustão direta é usada para obtenção de calor, geralmente em fornos, fogões e caldeiras (para geração de vapor). A pirólise ou carbonização é o processo no qual o produto principal formado é o carvão vegetal, que apresenta vantagens como a densidade energética duas vezes maior que a biomassa de origem e queima em temperaturas muito maiores. Já a gaseificação ocorre

através de reações termoquímicas envolvendo vapor quente e oxigênio, ocorrendo a transformação do combustível sólido em gás. Esse gás pode ser utilizado em motores ou turbinas para geração de energia elétrica. Outra vantagem importante da gaseificação é a remoção de componentes químicos prejudiciais ao meio ambiente. (ANEEL, 2008).

Em relação à qualidade da biomassa, os fatores mais importantes a serem considerados para a geração de energia são o teor de umidade e a presença de impurezas. Quanto maior a umidade presente menor será o poder calorífico do material, com isso é necessário um volume maior para a geração da quantidade de energia desejada. Por isso, a umidade está diretamente relacionada ao preço da biomassa. De forma semelhante acontece com a presença de impurezas, que além dos problemas já citados também é responsável pelo aumento da quantidade de cinzas geradas no processo de queima, trazendo maiores impactos ambientais e custos para a destinação correta deste resíduo. (SIMIONI, 2007).

Nos últimos anos, a produção de biomassa florestal no Brasil manteve-se estável, com 142,3 milhões de m³ no ano de 2014 com previsão de 143,3 milhões de m³ para 2015 (Figura 4). Como em 2015 o consumo aparente de biomassa florestal no país foi de 138 milhões de m³, entende-se que 96% da biomassa produzida é consumida internamente. (ACR, 2016).

Figura 4 – Evolução do consumo aparente e produção de biomassa de origem florestal no Brasil.



Fonte: ACR (2016, p. 39).

A oferta total de energia proveniente da biomassa em 2016 correspondeu a 29,9% da matriz energética nacional (em 2015 correspondeu a 29,3%). A lenha foi responsável por 26,8% da bioenergia, os produtos resultantes da cana (etanol e o bagaço) foram responsáveis por 58,4%. Outras biomassas como resíduos de madeira, resíduos da agroindústria, biodiesel e lixo foram responsáveis por 14,8% da bioenergia. (MME, 2017).

Das usinas termelétricas que utilizam resíduos florestais no Brasil, 23,8% estão localizadas em Santa Catarina, demonstrando a importância do estado na geração de energia a partir da biomassa. Essa energia é utilizada principalmente em caldeiras nas mais diversas indústrias como: têxteis, agronegócio, frigoríficas, celulose e papel e também nas próprias serrarias no processo de secagem da madeira. (ACR, 2016).

2.2.2.1 Carvão vegetal

O maior produtor mundial de carvão vegetal é o Brasil, sendo que 85% do total produzido no país é consumido pela indústria, principalmente do aço, ferro-gusa e ferro-ligas. O processo de carbonização transforma a lenha em um combustível bem mais interessante em relação à qualidade e conteúdo energético, geralmente com o dobro da densidade energética quando comparada ao material inicial, além de queimar a temperaturas mais altas. O carvão vegetal apresenta, na média: 6460 kcal/kg de poder calorífica, 65% a 80% de carbono fixo, 20% a 30% de material volátil e de 1% a 3% de cinzas. (ANEEL, 2008).

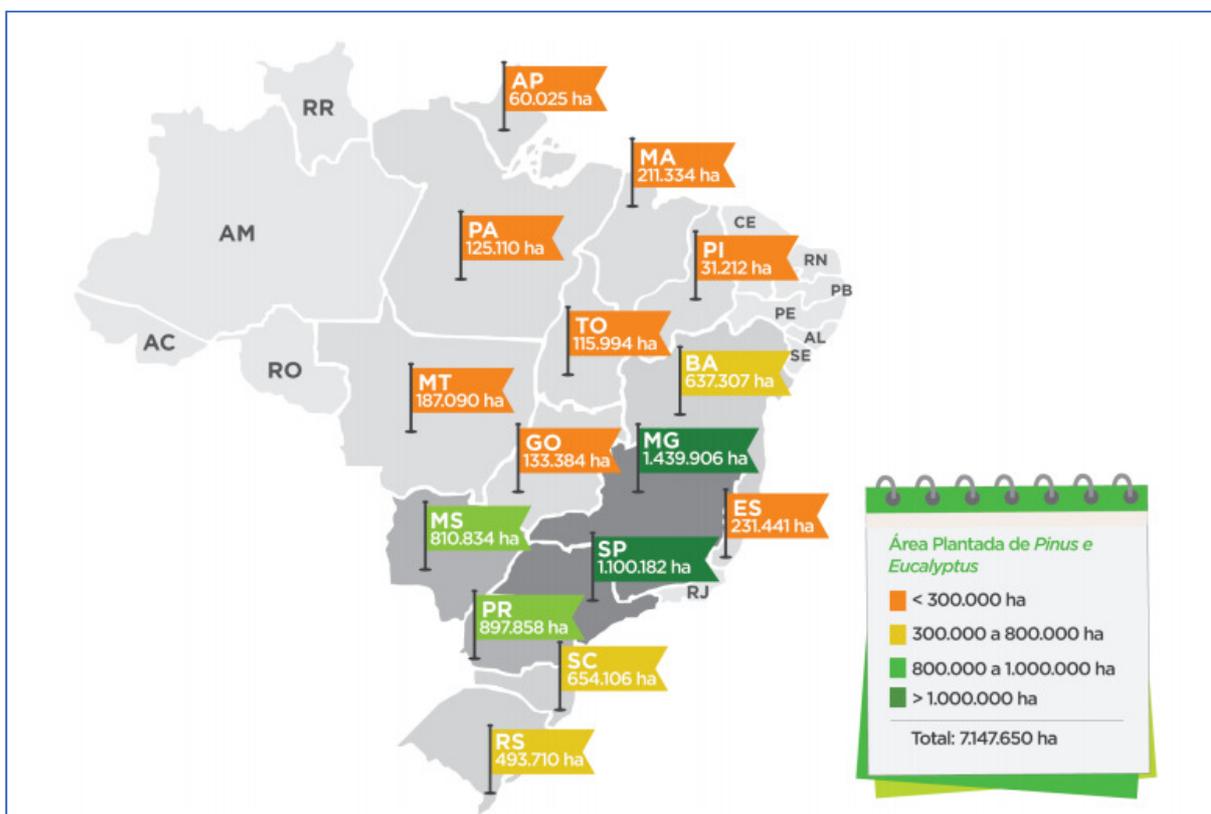
2.2.3 Fontes de biomassa

O material florestal resultante de cortes, podas e os resíduos das indústrias da madeira são considerados biomassa de origem florestal, que ainda pode ser dividida em primária e secundária. A biomassa florestal primária é o material vegetal encontrado nos terrenos florestais gerados nas atividades como cortes de árvores (finais, intermediários, podas, desbastes, etc.) A biomassa de origem secundária é aquela gerada na indústria de transformação da madeira como serragem, aparas, cavacos e licor negro gerado em serrarias, fábricas de celulose, fábrica de pallets e movelarias. (OLIVEIRA, 2015).

No Brasil, a principal fonte de abastecimento da cadeia produtiva florestal são as florestas plantadas, com destaque para os plantios de *Pinus* e *Eucalyptus*, que mesmo ocupando somente 1,4% da área florestal (nativas e plantadas) foram responsáveis por 82% da

produção e suprimento de madeira em tora no país. Em Santa Catarina, 660,7 mil hectares são de florestas plantadas, sendo que destes, 82% são de plantio de *Pinus*, 17% de *Eucalyptus* e 1% de outros grupos de espécies. (ACR, 2016).

Figura 5 – Localização e área plantada com *Pinus* e *Eucalyptus* no Brasil em 2014.

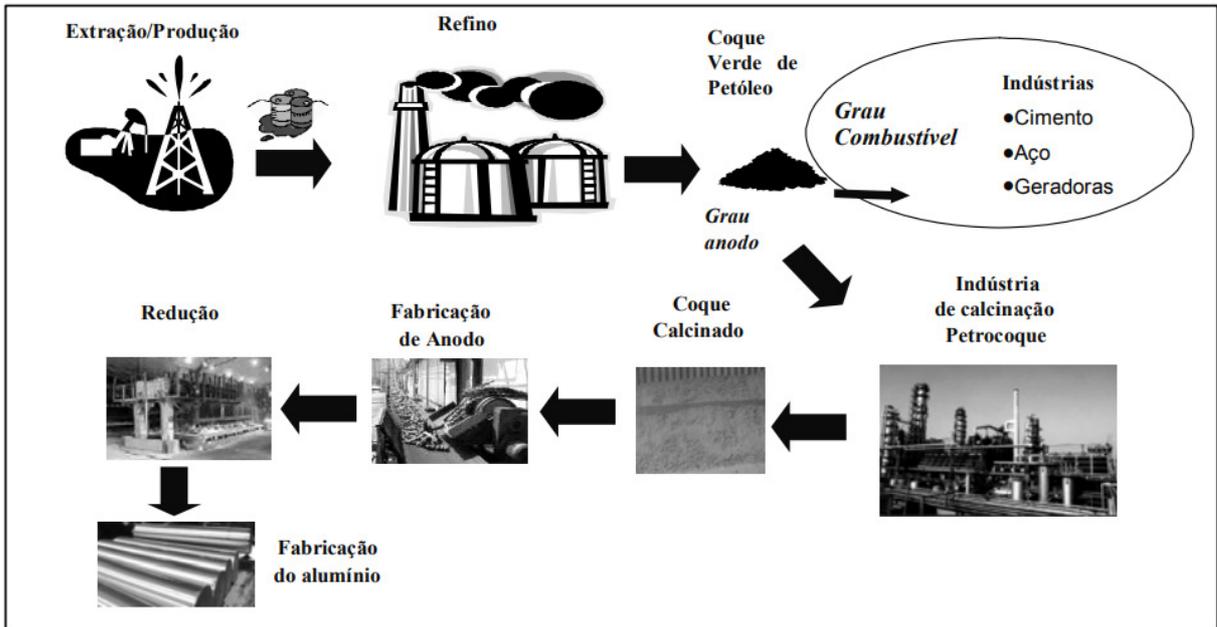


Fonte: ACR (2016, p. 26).

2.3 COQUE VERDE DE PETRÓLEO

Existem dois tipos de coque verde de petróleo nacional, produzido pela Petrobrás, o Coque Grau Combustível e o Coque Grau Anodo. O Coque Grau Combustível é utilizado como combustível na indústria comum do cimento, cerâmica vermelha, calcinadoras de gesso, entre outras. Possui características como enxofre abaixo de 1%, poder calorífico médio de 8700 kcal/kg, cinza média de 3%, matéria volátil aproximada de 12%, que demonstram sua excelente qualidade na utilização para esta finalidade. Rico em carbono, o Coque Grau Anodo é utilizado como matéria-prima nobre na indústria de alumínio e tem como característica média: enxofre menor que 1%, 10% de matéria volátil e 250 ppm de vanádio. (CAMARGO; CARVALHO; KOBAYOSHI, 2006).

Figura 6 – Fluxograma de produção e aplicação do coque verde de petróleo.



Fonte: CAMARGO; CARVALHO; KOBAYOSHI (2006, p.06).

O coque verde é um derivado do petróleo e é obtido a partir do craqueamento de óleos residuais pesados em Unidades do Coqueamento Retardado (UCR). É um material sólido de cor negra com alto teor de carbono fixo e baixo teor de compostos inorgânicos. O termo “verde” é devido seu estágio do processo de produção. (PETROBRAS, 2018).

Figura 7 – Coque verde.



Fonte: PETROBRAS, 2018.

2.4 CO-COMBUSTÃO

A combustão conjunta de diferentes combustíveis em um mesmo equipamento é chamada de co-combustão. A co-combustão ou *co-firing* tem sido muito utilizada (principalmente na Europa e nos Estados Unidos) para reduzir as emissões de CO₂, NO_x e SO₂ em centrais térmicas movidas a carvão. (OLIVEIRA, 2015).

A biomassa utilizada na co-combustão em usinas térmicas a carvão pode ser uma forma a curto prazo de incentivar o uso de fontes renováveis para geração de energia por não serem necessários grandes investimentos ou modificações no processo. Devido a existência de uma grande quantidade de usinas termelétricas a carvão pulverizado em todo o mundo, a combustão em conjunto com a biomassa apresenta uma enorme oportunidade de crescimento. Vantagens como a redução de poluentes atmosféricos, forma de aumentar a utilização de fontes renováveis para geração de energia e maior eficiência em plantas quando comparadas aquelas movidas apenas por biomassa demonstram a importância da associação da biomassa em plantas movidas a carvão. (GHENAI; JANAJREH, 2010).

O baixo teor de enxofre e nitrogênio nos combustíveis derivados de biomassa quando comparado aos combustíveis fósseis é outra vantagem para sua utilização. A utilização de biomassa de resíduos da indústria também reduz os impactos ambientais decorrentes da destinação destes resíduos. Entretanto, alguns cuidados devem ser considerados em processos de co-combustão com biomassa em leito fluidizado. Alguns materiais orgânicos como folhas de árvores e palha vegetal possuem alto teor de cinzas, umidade alta e baixa densidade podendo influenciar negativamente no funcionamento do equipamento como dificultar a fluidização do leito e problemas de segregação. (LINHARES, 2016).

Em pesquisa realizada em relação aos parâmetros fluidodinâmicos, os resultados demonstraram a compatibilidade técnica na combustão mista de carvão mineral e serragem em um mesmo equipamento utilizando o processo de leito fluidizado. Fato este, que além das caldeiras de carvão pulverizado, possibilita a implantação de pequenas centrais térmicas (PCT's) utilizando a combustão conjunta de carvão mineral e biomassa em caldeiras de leito fluidizado em locais onde a utilização destes combustíveis apresente viabilidade econômica. (GOMES; SOARES; ZEN 2011).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 TIPO DE PESQUISA

O estudo realizado foi uma pesquisa explicativa, do tipo estudo de caso e de abordagem quantitativa. Nesta investigação, o caso aprofundado foi a preparação de uma mistura combustível a partir de rejeitos ultrafinos de carvão mineral e outros resíduos industriais combustíveis.

Os estudos de caso representam uma investigação empírica de modo abrangente, através da lógica do planejamento, coleta e análise de dados. Pode ser realizado um único estudo de caso ou múltiplos, assim como as abordagens podem ser quantitativas ou qualitativas. (YIN, 2001).

A constatação das variáveis dependentes e independentes levou a necessidade de realizar uma profunda revisão bibliográfica referente aos materiais combustíveis para basear a hipótese elencada: uma composição adequada de rejeitos ultrafinos de carvão e outros materiais combustíveis para geração de energia.

A coleta de dados foi realizada através de anotações das unidades amostrais definidas.

3.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

3.2.1 Identificação dos materiais combustíveis disponíveis no mercado

A primeira etapa da pesquisa foi localizar os materiais existentes no mercado que poderiam compor uma mistura combustível, associados aos rejeitos de ultrafinos de carvão gerado pela empresa onde foi realizado o estágio. Todas as misturas realizadas tiveram a presença do rejeito ultrafino de carvão, que é o resíduo gerado durante o processo de beneficiamento existente na empresa. Os outros combustíveis foram pesquisados de acordo com o potencial energético já conhecido ou outros parâmetros através da literatura que poderiam melhorar a qualidade do rejeito ultrafino de carvão.

Foram pesquisados os seguintes materiais:

- Rejeito ultrafino de carvão mineral;
- Biomassa;
- Turfa;
- Coque verde;
- Finos de carvão vegetal.

3.2.2 Caracterização dos materiais selecionados

Para a caracterização dos materiais combustíveis selecionados foram coletadas amostras de cada um deles e enviadas para o laboratório da própria empresa, onde foram realizados os ensaios de: umidade total; umidade higroscópica; teor de cinzas; enxofre total; matéria volátil; poder calorífico superior (PCS) e granulometria.

3.2.3 Definição das misturas combustíveis

Após a caracterização foram simuladas diversas misturas de forma que os demais materiais selecionados quando combinados pudessem melhorar a qualidade do rejeito ultrafino de carvão como combustível, tendo como base os parâmetros definidos pelo carvão mineral utilizado no complexo termelétrico Jorge Lacerda para a geração de energia elétrica.

Com efeito, foram selecionadas 09 (nove) misturas de acordo com a qualidade esperada, conforme a simulação. Elas deveriam passar pelo processo de mistura intensiva, seguida de granulação com o objetivo de transformar os diferentes materiais em uma mistura combustível aparentemente homogênea e de granulometria maior. Portanto, além da qualidade, a mistura dos diferentes combustíveis deveria possuir uma proporção na qual seria possível a transformação do material ultrafino em material granulado através do equipamento utilizado.

A realização dos testes deu-se através da utilização de um Misturador Intensivo/Granulador do fabricante EIRICH – modelo R08W com volume útil de 75 litros (Figura 8). Este é um equipamento piloto desenvolvido pelo fabricante para pesquisa e desenvolvimento de processos de mistura e granulação.

Figura 8 – Misturador intensivo/granulador.



Fonte: do autor, 2018.

Os materiais seleccionados foram depositados dentro da cuba do granulador de acordo com a composição definida para cada mistura. O processo de mistura, seguido pela granulação ocorreu dentro do equipamento, onde a cuba gira no sentido horário e o agitador no sentido anti-horário. Esse movimento é o responsável pelo crescimento dos grânulos. Em algumas misturas foi necessária a adição de água para que ocorresse a formação e crescimento dos grânulos. A Figura 9 demonstra os materiais (rejeito ultrafino de carvão mineral e biomassa) depositados dentro da cuba do equipamento.

Figura 9 – Materiais depositados dentro da cuba do granulador.



Fonte: do autor, 2018.

A Tabela 1 apresenta a relação dos materiais selecionados para cada mistura.

Tabela 1 – Relação dos testes realizados

| TESTES | MATERIAIS | | | | | |
|------------------|-------------------------------------|-----------|-------------------------|-----------|------------|-----------|
| | MATERIAL 1 | PESO (kg) | MATERIAL 2 | PESO (kg) | MATERIAL 3 | PESO (kg) |
| Mistura 1 | Rejeito ultrafino de carvão mineral | 27,0 | Biomassa | 10,0 | - | - |
| Mistura 2 | Rejeito ultrafino de carvão mineral | 27,0 | Biomassa | 12,0 | - | - |
| Mistura 3 | Rejeito ultrafino de carvão mineral | 21,0 | Coque verde | 9,0 | - | - |
| Mistura 4 | Rejeito ultrafino de carvão mineral | 30,0 | Coque verde | 20,0 | - | - |
| Mistura 5 | Rejeito ultrafino de carvão mineral | 21,0 | Turfa | 9,0 | - | - |
| Mistura 6 | Rejeito ultrafino de carvão mineral | 40,0 | Turfa | 10,0 | - | - |
| Mistura 7 | Rejeito ultrafino de carvão mineral | 21,0 | Finos de Carvão Vegetal | 9,0 | - | - |
| Mistura 8 | Rejeito ultrafino de carvão mineral | 12,0 | Coque verde | 4,0 | Biomassa | 4,0 |
| Mistura 9 | Rejeito ultrafino de carvão mineral | 12,0 | Biomassa | 4,0 | Turfa | 4,0 |

Fonte: do autor, 2018.

3.2.4 Teste industrial

Foi realizado um teste com a mistura 1 em uma caldeira de leito fluidizado, tipo borbulhante em uma cerâmica da região sul do Estado de Santa Catarina. A caldeira opera com finalidade de gerar calor para um secador, que por sua vez atua para baixar a umidade da argila para até 4% que é utilizada nos processos de fabricação de telhas e pisos dessa unidade fabril. O combustível utilizado frequentemente nessa caldeira é o fino de carvão mineral com as mesmas características/qualidade (exceto a granulometria) do carvão utilizado nas caldeiras do complexo termelétrico Jorge Lacerda, ou seja, com o poder calorífico de 4.500 kcal/kg.

Utilizou-se a mistura 1 por ter sido a única das misturas produzidas em quantidade suficiente para a realização do teste, foram utilizadas 1.200 kg. Para avaliar a mistura como combustível, foram monitoradas a temperatura do fundo do leito, a temperatura da parte superior do leito e a temperatura do secador durante a queima da mistura.

A mistura foi carregada no caixão alimentador com o auxílio de uma pá-carregadeira (Figura 10).

Figura 10 – Carregamento (A), abastecimento (B) e alimentação da mistura na caldeira (C)



(A)



(B)



(C)

Fonte: do autor, 2018.

3.3 ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.3.1 Materiais combustíveis disponíveis no mercado

Em uma das minas de carvão da empresa onde foi realizado o estágio, o carvão bruto ou ROM (Run Of Mine), possui em média 67% de cinza. A recuperação no beneficiamento é de 35%, ou seja, 65% do material extraído são rejeitos. Destes, 70% são rejeitos grossos e 30% são finos e ultrafinos. Todos esses rejeitos, grossos e finos, são enviados para os depósitos de rejeitos. Como são extraídos em média 42.000 t de carvão bruto por mês, aproximadamente 8.200 t são de rejeitos finos e ultrafinos (material utilizado em todos os testes). Somando com os rejeitos ultrafinos de outra mina da mesma empresa, tem-se ao todo 14.000 t deste material gerado mensalmente.

A biomassa pesquisada e utilizada nos testes foi a serragem de madeira. Como existem muitas indústrias madeireiras na região, este resíduo também pode ser encontrado em significativa quantidade. A desvantagem é a logística, pois é preciso coletar pequenas porções em várias empresas diferentes. Na grande maioria das indústrias esse resíduo é descartado no meio ambiente.

Algumas empresas vendem esse material e outras estão utilizando equipamentos para formar briquetes ou *pellets*. Como existem muitas indústrias próximas à região do estudo, esse material pôde ser encontrado em quantidade suficiente para atender a demanda do projeto. Observou-se que há a disponibilidade média mensal de 5.000 t de biomassa em um raio de aproximadamente 50 quilômetros.

A turfa pesquisada é proveniente da região de Araranguá/SC e observou-se a disponibilidade de 3.000 t mensais. O fornecimento desse material é limitado, pois depende das condições climáticas para sua extração e processamento.

O coque verde de petróleo pesquisado foi o importado, principalmente pela questão financeira, por ter custo menor que o coque verde nacional e também por esse produto já ter sido comprado pela empresa em outras ocasiões para outras finalidades, na fabricação de derivados de carvão. Esse material pode ser comprado em grandes quantidades, ou seja, sua disponibilidade é superior aquela necessária para o projeto.

De todos os materiais pesquisados, os finos de carvão vegetal é o que possui menor disponibilidade, em torno de 350 t mensais, o que limita sua utilização na composição de uma mistura combustível produzida em escala industrial. Mesmo assim foi realizado um

teste com a utilização deste material, por ser um combustível de boa qualidade. Os finos de carvão vegetal são gerados nos processos de produção e de empacotamento devido sua granulometria ser menor que a necessária para ser comercializada. Igualmente como ocorre com a biomassa, existe o problema de logística para a compra deste material, sendo necessário coletar pequenas quantidades em várias empresas diferentes, que estão localizadas principalmente no Estado do Rio Grande do Sul.

A Tabela 2 apresenta a quantidade mensal aproximada disponível no mercado para os materiais selecionados para a realização dos testes.

Tabela 2 – Quantidade mensal disponível dos materiais selecionados

| Material | Quantidade Disponível (t) |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| Rejeito ultrafino de carvão mineral | 14.000 |
| Biomassa (serragem de madeira) | 5.000 |
| Coque verde | > 10.000 |
| Turfa | 3.000 |
| Finos de carvão vegetal | 350 |

Fonte: do autor, 2018.

3.3.2 Caracterização dos materiais selecionados

A Tabela 3 apresenta o resultado da caracterização dos materiais selecionados para compor as misturas combustíveis e o padrão estabelecido para queima no complexo termelétrico Jorge Lacerda (CTJL) para comparação. Pode-se observar a qualidade inferior do rejeito ultrafino de carvão, com alto teor de cinzas e baixo poder calorífico. Por isso, a importância de associá-lo a outros materiais para melhorar sua qualidade como combustível.

Tabela 3 – Caracterização dos materiais selecionados

| Material | Cinza (%) | Matéria volátil (%) | Enxofre Total (%) | Umidade Total (%) | PCS kcal/kg |
|-------------------------------------|------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|
| Padrão CTJL | ≤ 44,00 | ≥ 20,00 | ≤ 2,30 | ≤ 10,00 | ≥ 4.500,00 |
| Rejeito ultrafino de carvão mineral | 61,29 | 16,94 | 1,39 | 22,74 | 2.717,00 |
| Biomassa (serragem de madeira) | 0,75 | 83,19 | 0,25 | 33,33 | 4.431,00 |
| Coque verde | 0,43 | 11,25 | 0,61 | 6,48 | 8.335,00 |
| Turfa | 20,77 | 53,13 | 0,44 | 58,41 | 6.499,00 |
| Finos de carvão vegetal | 10,42 | 25,96 | 0,00 | 27,41 | 7.421,00 |

Fonte: Dados da empresa investigada, 2018.

3.3.3 Testes de granulação das misturas combustíveis selecionadas

Procedimento foi realizado no equipamento de acordo com a Tabela 4. Na primeira etapa, que tem duração de 30 segundos, ocorre a mistura intensiva dos materiais. Nessa etapa, o agitador gira no sentido anti-horário com velocidade de 20 m/s enquanto a cuba gira no sentido horário a 0,5 m/s.

Dependendo da umidade é necessário o acréscimo de água para promover a união dos materiais e por consequência a granulação das misturas. Isso ocorre na segunda etapa e tem a duração de 30 segundos. Quando não foi necessário o acréscimo de água essa etapa não foi suprimida, apenas não foi realizada a umidificação das misturas.

A próxima etapa é a granulação, a velocidade do agitador é diminuída para 10 m/s e a da cuba é aumentada para 1 m/s, favorecendo assim a formação dos grânulos. Essa etapa tem duração de 2 minutos. Posteriormente, a velocidade do agitador é diminuída novamente, desta vez, para 6 m/s e a da cuba é mantida a 1 m/s para ocorrer o crescimento dos grânulos. Essa é a última etapa e também tem a duração de 2 minutos. Assim, todo o processo dentro do equipamento tem a duração de 5 minutos.

O misturador/granulador opera em batelada, ou seja, existe o tempo de carga e descarga do material que deve ser considerado em um processo industrial.

Tabela 4 - Etapas da mistura e granulação

| Tempo total (min) | Tempo etapa (min) | Velocidades | | Etapa do processo |
|----------------------|----------------------|----------------|------------|--------------------------|
| | | Agitador (m/s) | Cuba (m/s) | |
| 0,5 | 0,5 | 20 | 0,5 | Mistura seca |
| 1 | 0,5 | 20 | 0,5 | Adição de água/mistura |
| 3 | 2 | 10 | 1 | Granulação |
| 5 | 2 | 6 | 1 | Crescimento dos grânulos |

Fonte: do autor, 2018.

3.3.3.1 Mistura 1

A primeira mistura realizada utilizou rejeito ultrafino de carvão mineral (73%) e biomassa (27%). Foi preciso adicionar 4,5 litros de água para ocorrer a granulação do material. A Tabela 5 apresenta os detalhes da mistura 1, bem como a qualidade da mistura combustível.

Tabela 5 – Mistura 1

| Materiais | | Peso (kg) | Peso (%) | Adição de Água (L) |
|----------------------|-------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 1 | Rejeito ultrafino de carvão mineral | 27 | 73,0% | 4,5 |
| 2 | Biomassa | 10 | 27,0% | |
| Total | | 37 | 100,0% | |
| Resultado da Análise | | | | |
| Cinza (%) | Matéria volátil (%) | Enxofre Total (%) | Umidade Total (%) | PCS kcal/kg |
| 56,27 | 20,39 | 1,40 | 22,61 | 3.274,00 |

Fonte: do autor, 2018.

Conforme pode ser observado na Figura 10 ocorreu a granulação da mistura. Através da análise do laboratório da empresa verificou-se a melhora da qualidade do combustível, quando comparado com o rejeito ultrafino de carvão.

Figura 10 – Mistura 1.



Fonte: do autor, 2018.

3.3.3.2 Mistura 2

Na mistura 2 utilizou-se o rejeito ultrafino de carvão mineral (69,2%) e biomassa (30,8%). Mesmo após a adição de 6,0 litros de água não ocorreu a granulação da mistura, devido ao excesso de biomassa. A Tabela 6 apresenta os detalhes da mistura 2 e a Figura 11 a mistura no final do processo.

Tabela 6 – Mistura 2

| Materiais | | Peso (kg) | Peso (%) | Adição de Água (L) |
|----------------------|-------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 1 | Rejeito ultrafino de carvão mineral | 27 | 69,2% | 6,0 |
| 2 | Biomassa | 12 | 30,8% | |
| Total | | 39 | 100,0% | |
| Resultado da Análise | | | | |
| Cinza (%) | Matéria volátil (%) | Enxofre Total (%) | Umidade Total (%) | PCS kcal/kg |
| 52,40 | 22,62 | 1,35 | 24,98 | 3.458,00 |

Fonte: do autor, 2018.

Figura 11 – Mistura 2.



Fonte: do autor, 2018.

3.3.3.3 Mistura 3

A composição da mistura 3 foi de 30% de coque verde e 70% de rejeito ultrafino de carvão mineral. Como esperado, a boa qualidade do coque verde como combustível reduziu o teor de cinzas e aumentou o poder calorífico de forma significativa.

Tabela 7 – Mistura 3

| Materiais | | Peso (kg) | Peso (%) | Adição de Água (L) |
|----------------------|-------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 1 | Rejeito ultrafino de carvão mineral | 21 | 70,0% | S/ Água |
| 2 | Coque Verde | 9 | 30,0% | |
| Total | | 30 | 100,0% | |
| Resultado da Análise | | | | |
| Cinza (%) | Matéria volátil (%) | Enxofre Total (%) | Umidade Total (%) | PCS kcal/kg |
| 46,96 | 14,09 | 1,17 | 13,40 | 4.098,00 |

Fonte: do autor, 2018.

Na mistura do rejeito ultrafino de carvão mineral com o coque verde observou-se a granulação do material (Figura 12).

Figura 12 – Mistura 3.



Fonte: do autor, 2018.

3.3.3.4 Mistura 4

Na mistura 4 foi aumentado o percentual de coque verde em relação à mistura 3, que passou de 30% para 40%. A mistura 4 também granulou, porém, conforme a Figura 13, o tamanho dos grânulos não foram uniformes. Ainda assim, a mistura combustível apresentou boa qualidade, com teor de cinzas de 39,10% e poder calorífico superior de 4.816,00 kcal/kg.

Tabela 8 – Mistura 4

| Materiais | | Peso (kg) | Peso (%) | Adição de Água (L) |
|----------------------|-------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 1 | Rejeito ultrafino de carvão mineral | 30 | 60,0% | S/ Água |
| 2 | Coque Verde | 20 | 40,0% | |
| Total | | 50 | 100,0% | |
| Resultado da Análise | | | | |
| Cinza (%) | Matéria volátil (%) | Enxofre Total (%) | Umidade Total (%) | PCS kcal/kg |
| 39,10 | 13,36 | 1,09 | 12,00 | 4.816,00 |

Fonte: do autor, 2018.

Figura 13 – Mistura 4.



Fonte: do autor, 2018.

3.3.3.5 Mistura 5

Conforme a Figura 14, com a utilização da turfa verificou-se que a mistura formou um material granulado, entretanto, não muito uniforme em relação à granulometria. Observou-se a melhora da qualidade da mistura quando comparada com o rejeito ultrafino de carvão mineral, principalmente no aumento do teor de matéria volátil e aumento do poder calorífico.

Tabela 9 – Mistura 5

| Materiais | | Peso (kg) | Peso (%) | Adição de Água (L) |
|----------------------|-------------------------------------|---------------|---------------|--------------------|
| 1 | Rejeito ultrafino de carvão mineral | 21 | 70,0% | S/ Água |
| 2 | Turfa | 9 | 30,0% | |
| | Total | 30 | 100,0% | |
| Resultado da Análise | | | | |
| Cinza | Matéria volátil | Enxofre Total | Umidade Total | PCS |
| (%) | (%) | (%) | (%) | kcal/kg |
| 53,59 | 22,96 | 1,16 | 25,10 | 3.494,00 |

Fonte: do autor, 2018.

Figura 14 – Mistura 5.



Fonte: do autor, 2018.

3.3.3.6 Mistura 6

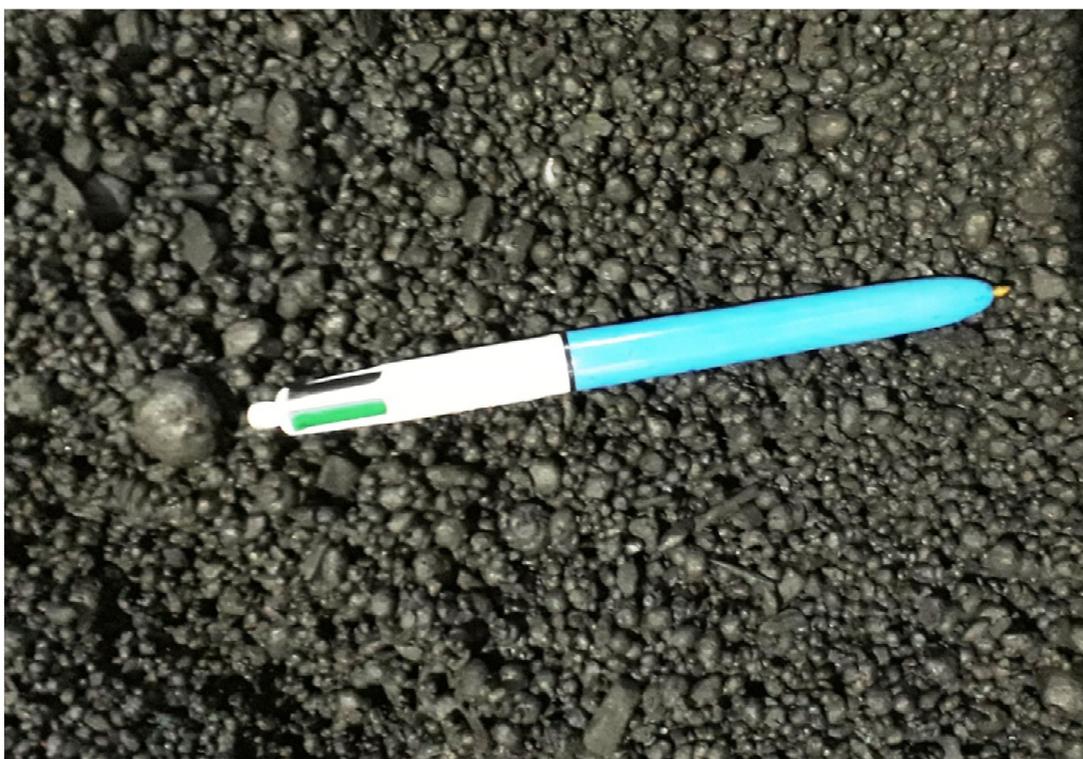
Na mistura 6 foi reduzido o percentual de turfa em relação à mistura 5, que passou de 30% para 20%. Pode ser verificada a formação de material granulado com maior homogeneidade em relação à granulometria (Figura 15). Entretanto, a redução da quantidade de turfa reduziu também a qualidade da mistura 6 quando comparada à mistura 5.

Tabela 10 – Mistura 6

| Materiais | | Peso (kg) | Peso (%) | Adição de Água (L) |
|----------------------|-------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 1 | Rejeito ultrafino de carvão mineral | 40 | 80,0% | S/ Água |
| 2 | Turfa | 10 | 20,0% | |
| Total | | 50 | 100,0% | |
| Resultado da Análise | | | | |
| Cinza (%) | Matéria volátil (%) | Enxofre Total (%) | Umidade Total (%) | PCS kcal/kg |
| 56,35 | 20,67 | 1,31 | 20,45 | 3.239,00 |

Fonte: do autor, 2018.

Figura 15 – Mistura 6.



Fonte: do autor, 2018.

3.3.3.7 Mistura 7

Com a utilização de finos de carvão vegetal (30%) observou-se que o material apresentou boa granulação (Figura 16). Em relação à qualidade, a Tabela 11 demonstra que mistura com o carvão vegetal obteve excelentes resultados como poder calorífico perto de 5.000 kcal/kg e teor de cinzas de 48,36%.

Tabela 11 – Mistura 7

| Materiais | | Peso (kg) | Peso (%) | Adição de Água (L) |
|----------------------|-------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 1 | Rejeito ultrafino de carvão mineral | 21 | 70,0% | S/ Água |
| 2 | Finos de carvão vegetal | 9 | 30,0% | |
| Total | | 30 | 100,0% | |
| Resultado da Análise | | | | |
| Cinza (%) | Matéria volátil (%) | Enxofre Total (%) | Umidade Total (%) | PCS kcal/kg |
| 48,36 | 17,13 | 1,08 | 24,60 | 4.994,74 |

Fonte: do autor, 2018.

Figura 16 – Mistura 7.



Fonte: do autor, 2018.

3.3.3.8 Mistura 8

De todas as misturas realizadas, os resultados demonstraram que a mistura 8 foi a que mais se aproximou do carvão utilizado no complexo termelétrico Jorge Lacerda. A mistura contendo 60% de rejeito ultrafino de carvão mineral, 20% de coque verde e 20% de biomassa apresentou um material granulado com 4.492,00 kcal/kg; 24,26% de material volátil e 42,70% de cinza, além de baixo teor de enxofre (0,84%).

Tabela 12 – Mistura 8

| Materiais | | Peso (kg) | Peso (%) | Adição de Água (L) |
|----------------------|-------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 1 | Rejeito ultrafino de carvão mineral | 12 | 60,0% | 1,5 |
| 2 | Coque verde | 4 | 20,0% | |
| 3 | Biomassa | 4 | 20,0% | |
| Total | | 20 | 100,0% | |
| Resultado da Análise | | | | |
| Cinza (%) | Matéria volátil (%) | Enxofre Total (%) | Umidade Total (%) | PCS kcal/kg |
| 42,70 | 24,26 | 0,84 | 23,29 | 4.492,00 |

Fonte: do autor, 2018.

Figura 17 – Mistura 8



Fonte: do autor, 2018.

3.3.3.9 Mistura 9

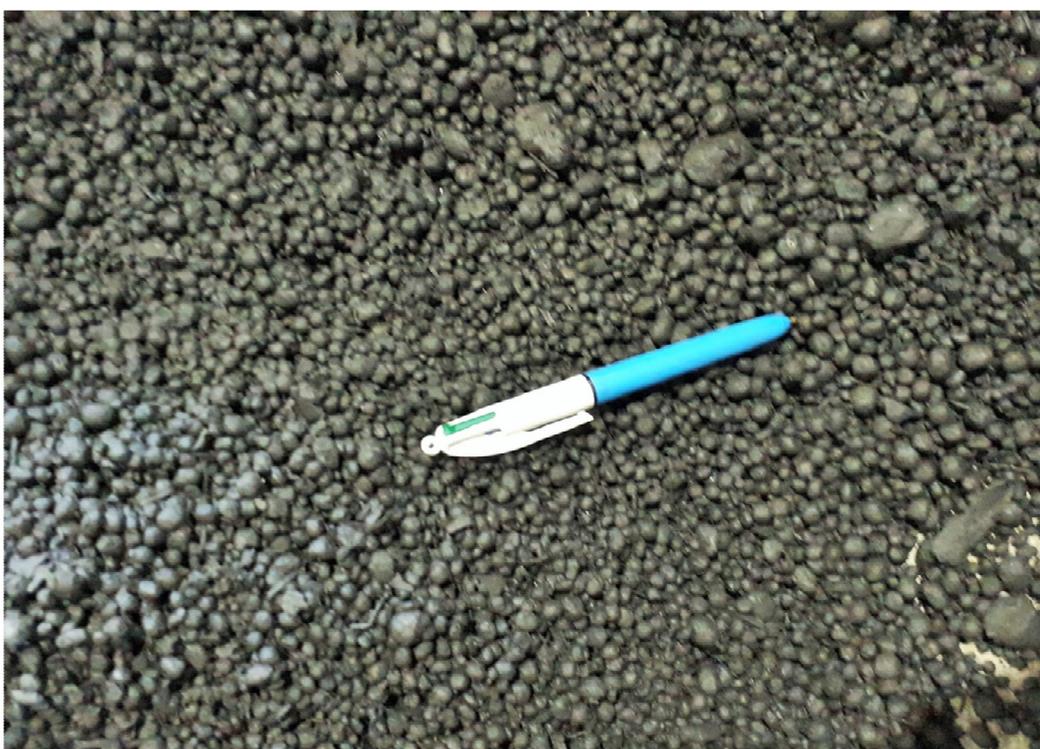
Na mistura 9 foram utilizados 3 materiais: rejeito ultrafino de carvão mineral (60%); biomassa (20%) e turfa florestal (20%). A mistura apresentou um material granulado com poder calorífico superior de 3.513 kcal/kg, 28,70% de matéria volátil e 53,36% de cinza.

Tabela 13 – Mistura 9

| Materiais | | Peso (kg) | Peso (%) | Adição de Água (L) |
|----------------------|-------------------------------------|---------------|---------------|--------------------|
| 1 | Rejeito ultrafino de carvão mineral | 12 | 60,0% | 0,5 |
| 2 | Biomassa | 4 | 20,0% | |
| 3 | Turfa Florestal | 4 | 20,0% | |
| Total | | 20 | 100,0% | |
| Resultado da Análise | | | | |
| Cinza | Matéria volátil | Enxofre Total | Umidade Total | PCS |
| (%) | (%) | (%) | (%) | kcal/kg |
| 53,36 | 28,70 | 1,23 | 27,50 | 3.513,00 |

Fonte: do autor, 2018.

Figura 18 – Mistura 9



Fonte: do autor, 2018.

3.3.4 Teste em caldeira de leito fluidizado

Foram utilizados 1.200,00 kg de mistura 1 em uma caldeira de leito fluidizado tipo borbulhante. Durante o teste foram monitoradas a temperatura do fundo do leito, a temperatura da parte superior do leito e a temperatura do secador. O teste teve duração de 61 minutos.

Durante os primeiros 15 minutos de queima do combustível na caldeira, observou-se a diminuição gradativa da temperatura do fundo do leito e o aumento da temperatura da parte superior, enquanto a temperatura do secador manteve-se com pouca variação. Isso ocorreu devido à diferença de densidade da mistura combustível em relação ao carvão comumente utilizado na caldeira, o que fez com que a mistura queimasse na parte superior da caldeira. O problema foi corrigido pelo operador reduzindo a vazão de ar do leito, o que pôde ser verificado no restante do teste.

Para manter a temperatura do leito na faixa desejada e por consequência a temperatura do secador, foi necessário aumentar a dosagem da mistura combustível em relação ao combustível original. Esse fato já era esperado visto que o poder calorífico superior de 3.274 kcal/kg da mistura é menor que os 4.500 kcal/kg do carvão utilizado na caldeira, além da diferença da umidade total dos materiais, que da mistura 1 era de 22,61% e do carvão em torno de 8%. A mistura apresentou um consumo de aproximadamente 1.200 kg/h enquanto o carvão, segundo informado pela cerâmica, é de 800 kg/h.

A Figura 19 apresenta as temperaturas em graus Celsius do fundo do leito, do topo e da alimentação do secador respectivamente. Antes de iniciar o teste (A), 15 minutos após o início da queima da mistura na caldeira (B) e no final do teste (C), 60 minutos após o início.

Apesar de necessitar de uma quantidade maior de combustível, a mistura utilizada no teste manteve a temperatura do leito fluidizado na faixa desejada, assim como a temperatura de operação do secador. Esse fato comprovou a possibilidade de utilizar uma mistura combustível a partir dos rejeitos ultrafinos de carvão associado a outros materiais combustíveis.

Figura 19 – Indicadores de temperatura antes do teste (A), 15 minutos após o início (B) e no final do teste



(A)



(B)



(C)

Fonte: do autor, 2018.

4 CONCLUSÃO

Foram identificados cinco materiais combustíveis para compor as misturas: rejeito ultrafino de carvão mineral, biomassa (pó de serra), turfa, coque verde de petróleo e rejeito fino de carvão vegetal. Com exceção do rejeito fino de carvão vegetal, verificou-se a disponibilidade suficiente dos demais combustíveis selecionados para fazerem parte de uma mistura combustível em uma produção em escala industrial de acordo com as composições propostas.

Para a caracterização físico-química dos materiais selecionados foi coletada uma amostra de cada um deles e enviadas para o laboratório próprio da empresa investigada. Os resultados serviram de base para a formulação das misturas combustíveis.

Foram elaboradas nove (9) misturas combustíveis com composições e materiais diferentes. Ainda assim, em todas as misturas utilizou-se o rejeito ultrafino de carvão mineral por ser um resíduo gerado na empresa investigada e o principal responsável pela realização da pesquisa. A proporção dos materiais selecionados para cada mistura foi definida de acordo com seu potencial energético de forma a melhorar a qualidade do rejeito ultrafino de carvão mineral como combustível, fato este que ocorreu em todas as misturas.

Observou-se que o equipamento utilizado para a granulação das misturas combustíveis apresentou ótimo desempenho, transformando os diferentes materiais de cada mistura em combustíveis aparentemente homogêneos. A aparência homogênea é de suma importância tanto pela questão comercial do combustível, como para o desempenho da queima da mistura. A única exceção foi a mistura 2, que devido ao excesso de biomassa em sua composição, não foi observada a granulação. Concluiu-se que o equipamento é capaz de realizar de forma eficiente o processo de mistura e granulação dos combustíveis.

O teste realizado na caldeira de leito fluidizado que atua na geração de calor para um secador demonstrou a eficiência da mistura 1 como combustível. Através do monitoramento das temperaturas do fundo do leito e da parte superior durante a realização do teste, bem como a temperatura do secador que é alimentado pela caldeira demonstrou que a mistura combustível tem capacidade de substituir o combustível utilizado originalmente nessa caldeira. Apesar de necessitar de uma quantidade maior de combustível, principalmente devido o menor poder calorífico da mistura utilizada no teste, comprovou-se que é possível

desenvolver um combustível alternativo a partir dos rejeitos ultrafinos de carvão associados a outros materiais combustíveis.

Recomenda-se ainda o aprofundamento do estudo na empresa visando principalmente os seguintes aspectos: análise da viabilidade econômica para a preparação das misturas combustíveis e aquisição do equipamento utilizado, pesquisa de potenciais clientes dos combustíveis, processo de secagem das misturas granuladas e realização de novos testes em caldeiras para avaliar o comportamento das misturas combustíveis propostas.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8289: Determinação do teor de cinzas.** Rio de Janeiro, 1983. 4p.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8290: Determinação do teor de materiais voláteis.** Rio de Janeiro, 1983b. 3p.

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8297: Determinação dos teores das diferentes formas de enxofre.** Rio de Janeiro, 1983. 10p.

_____. – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8628: Determinação do poder calorífico superior e do poder calorífico inferior.** Rio de Janeiro, 1984. 18p.

ACR – ASSOCIAÇÃO CATARINENSE DE INDÚSTRIAS FLORESTAIS. **Anuário estatístico de base florestal para o estado de Santa Catarina 2016 (ano base 2015).** Lages/SC, 2016.

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

_____. **Carvão mineral.** Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília: ANEEL, 2014.

CAMARGO, Marcelo de; CARVALHO, Marcius Fabius Henriques; KOBAYOSHI, Marcelo. **Produção de Coque de Petróleo e sua Estratégia de Negociação.** XIII SIMPEP - Bauru, SP. Brasil, 2006

CHAVES, Arthur Pinto. **Carvão Brasileiro: tecnologia e meio ambiente.** Rio de Janeiro: CETEM, 2008.

CORTEZ, Luiz Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva; GÓMEZ, Edgardo Olivares. **Biomassa para energia.** Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008.

COSTA, João Felipe Coimbra Leite; KOPPE, Jair Carlos. **A lavra de carvão e o meio ambiente em Santa Catarina.** Rio de Janeiro: CETEM, 2008.

DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Ministério das Minas e Energia. **Informativo anual da Indústria Carbonífera.** Brasília, 1999.

GHENAI, Chaouki.; JANAJREH, Isam. **CFD analysis of the effects of co-firing biomass with coal.** Energy Conversion and Management, v. 51, p. 1694-1701, 2010.

GOMES, Gabriel M. Fae; SOARES, Maria Jorgina; ZEN, Leandro Dalla. **Combustão mista de carvão mineral e serragem em leito fluidizado**. UFRGS, 2011.

GUERRA, Terezinha. **Carvão e meio ambiente**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2000. 991 p.

KOPEZINSKI, Isaac. **Mineração x meio ambiente: considerações legais, principais impactos ambientais e seus processos modificadores**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2000.

LINHARES, Felipe de Aguiar de. **Avaliação fluidodinâmica e processo de co-combustão de resíduo de casca de acácia negra com carvão mineral em planta piloto de leito fluidizado borbulhante**. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

MENEZES, J. C. S. S. **Produção de coagulantes férricos na mineração de carvão**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Resenha energética brasileira: Exercício de 2016 – Brasília/DF**, 2017.

OLIVEIRA, Celso Marcelo de. **Livro Biomassa Briquete WoodPellets**. Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável. 2015.

PETROBRAS. Disponível em <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/produtos/industriais/coque-verde-de-petroleo/>>. Acesso em 28/04/2018

REDIVO, Rosimeri Venâncio. **Caracterização tecnológica do carvão das camadas barro branco e bonito para fins energéticos na região de Criciúma – SC**. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.

RIGOTTI, Nilo. **Meio ambiente e carvão: impactos da exploração e utilização**. Porto Alegre: FEPAM, 2002.

RUIZ, Astrid Sofia. **Flotação do carvão contido no rejeito da barragem *el cantor***. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

SAMPAIO, Carlos Hoffmann. **Meio ambiente e carvão: impactos da exploração e utilização**. Porto Alegre: FEPAM, 2002.

SILVA, R. A. **Recuperação Hidrometalúrgica de Metais da Drenagem Ácida de Minas por Precipitação Seletiva**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

SIMIONI, F. J. **Análise diagnóstica e prospectiva da cadeia produtiva de energia de biomassa de origem florestal no planalto sul de Santa Catarina.** 131 p. Tese de Doutorado em Engenharia Florestal. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.

YIN R. **Estudo de caso: planejamento e métodos.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman; 2001.