

ANDRÉ BELINASSI FERRAZ QUESSADA GIMENES

Substituição de carvão por biomassa em fornos de calcinação

André Belinassi Ferraz Quessada Gimenes

Substituição de carvão por biomassa em fornos de calcinação

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior

G491s Gimenes, André Belinassi Ferraz Quessada
Substituição de carvão por biomassa em fornos de calcinação / André
Belinassi Ferraz Quessada Gimenes – Guaratinguetá, 2019.
32 f : il.
Bibliografia: f. 31-32

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual
Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.
Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior

1. Calcinação (Metalurgia) 2. Cal. 3. Biomassa 4. Combustão 5. Fornos
metalúrgicos I. Título.

CDU 662.611

ANDRÉ BELINASSI FERRAZ QUESSADA GIMENES

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”


APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO


Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO
JUNIOR

Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. FERNANDO HENRIQUE MAYWORM DE
ARAÚJO

UNESP-FEG


Profa. Dra. ELIANA VIEIRA CANETTIERI
UNESP-FEG

DADOS CURRICULARES

ANDRÉ BELINASSI FERRAZ QUESSADA GIMENES

NASCIMENTO 20.09.1996 – Vila Franca de Xira / Portugal

FILIAÇÃO José Geraldo Ferraz Quessada Gimenes
Ana Maria Belinassi Gimenes

2015/2019 Engenharia Mecânica
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior que me concedeu a oportunidade de realizar este trabalho em um tema que me despertou o interesse,

aos meus pais José Geraldo Ferraz Quessada Gimenes e Ana Maria Belinassi Gimenes, que apesar das dificuldades enfrentadas, incentivaram meus estudos, me possibilitando aperfeiçoar e desenvolver, constantemente, novas habilidades,

aos meus colegas de minha república que sempre me motivaram em todos esses anos de graduação,

ao Roberto Rodrigues por ter disponibilizado seu conhecimento e informações de bastante ajuda no trabalho.

“Sonhos determinam o que você quer. Ação determina o que você conquista.”

Aldo Novak

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de carvão e algumas biomassas como combustíveis em fornos de calcinação na obtenção de Cal, material largamente utilizado em diversas atividades econômicas, como construção civil, indústria química, indústria do aço, agricultura, entre outras. Por ser um produto de amplo uso no mundo, é importante analisar seus processos produtivos, de forma a reduzir seu impacto financeiro no negócio e agressão ao meio ambiente na emissão de gases poluentes e rejeitos do processo. É então avaliada a eficiência entre esses dois combustíveis já citados, sendo utilizado como contexto o cenário brasileiro quanto sua disponibilidade, custo, e qualidade de seus compostos. Dispondo do software do pacote Office Excel, os cálculos de combustão puderam ser efetuados e automatizados utilizando fórmulas e programação no VBA, de forma que qualquer usuário possa entrar com os dados e obter os resultados. Além disso, o problema é avaliado num forno de calcinação real, tendo seus dados de produção e processos fornecidos por seu empresário.

PALAVRAS-CHAVE: Fornos de calcinação. Cal. Combustão biomassa e carvão.

ABSTRACT

The present work aims to evaluate the performance of coal and biomass as fuels in calcination furnaces to obtain lime, material widely used in various economic activities, such as construction, chemical industry, steel industry, agriculture, among others. As it is a widely used product in the world, it is important to analyze its production processes in order to reduce its financial impact on the business and environmental aggression in the emission of pollutant gases and process tailings. The efficiency between these two fuels already mentioned is then evaluated, using the Brazilian scenario as its availability, cost and quality of its compounds. Using the Office Excel package software, combustion calculations could be performed and automated using formulas and programming in VBA so that any user can enter the data and get the results. In addition, the problem is evaluated in a real calcining furnace, having your production data and processes supplied by your manager.

KEYWORDS: Calcination ovens. Lime. Combustion biomass and coal.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Cal Utilizada por Segmento do Mercado no Mundo em Toneladas por Ano | 13 |
| Figura 2 - Forno Rotativo | 16 |
| Figura 3 - Forno Vertical de Fluxo Paralelo Regenerativo | 17 |
| Figura 4 - Esquema Forno Vertical de Fluxo Paralelo Regenerativo..... | 18 |
| Figura 5 - Esquema Forno Vertical de Eixo Anular | 19 |
| Figura 6 – Balanceamento Automatizado | 22 |
| Figura 7 - Coeficientes NASA-Glenn | 23 |
| Figura 8 - Cálculos | 25 |
| Figura 9 - Planilha de Entrada | 26 |
| Figura 10 - Escolha dos Combustíveis | 26 |
| Figura 11 - Banco de Dados Combustíveis | 27 |
| Figura 12 - Exemplo Gráfico de Temperatura..... | 28 |
| Figura 13 – Relação de Volumes..... | 29 |
| Figura 14 – Análise Casca de Café..... | 30 |
| Figura 15 - Relação de Café e Coque | 30 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PCI Poder Calorífico Inferior

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------|-------------------------------|
| T | Temperatura |
| R | Constante Universal dos Gases |
| α | Excesso de Ar |

SUMÁRIO

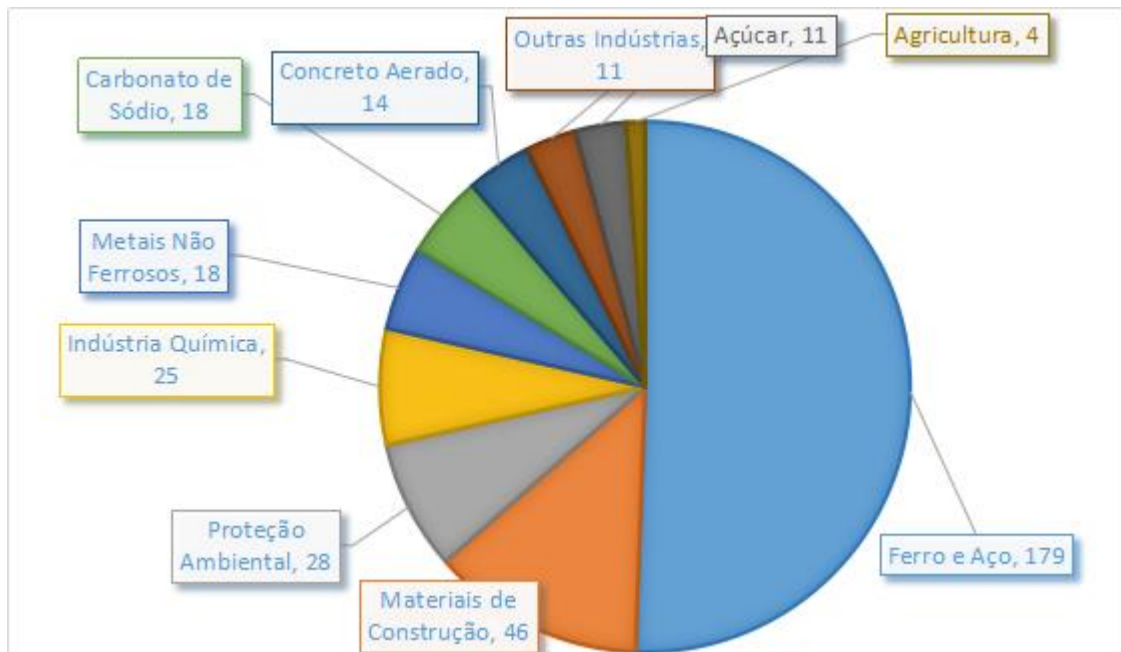
| | | |
|----------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 | A CAL | 13 |
| 1.2 | O PROCESSO | 14 |
| 1.2 | OBJETIVO | 14 |
| 1.4 | JUSTIFICATIVAS | 15 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 2.1 | TIPOS DE FORNOS | 16 |
| 3 | MÉTODO | 20 |
| 3.1 | HIPÓTESES | 20 |
| 3.2 | CONSERVAÇÃO DE MASSA | 20 |
| 3.3 | CONSERVAÇÃO DE ENERGIA | 22 |
| 4 | RESULTADOS | 25 |
| 4.1 | PLANILHA | 25 |
| 4.2 | APLICAÇÃO EM CASO REAL | 29 |
| 5 | CONCLUSÃO | 32 |
| | REFERÊNCIAS | Erro! Indicador não definido. |
| | BIBLIOGRAFIA CONSULTADA | 34 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 A CAL

A Cal (CaO) é um material de extrema necessidade para o desenvolvimento da civilização, visto que seu uso é largamente utilizado em diversas áreas como na construção civil para produção de materiais de construção, em siderúrgicas, uso na agricultura para correção de pH do solo, entre outras diversas aplicações, como podem ser vistas no gráfico da Figura 1, que mostra a quantidade deste insumo utilizada nas em alguns dos principais segmentos do mercado.

Figura 1 – Cal Utilizada por Segmento do Mercado no Mundo em Toneladas por Ano



Fonte: USGS Minerals Yearbook (2013).

Visto que há uma tendência na melhoria da infraestrutura, saneamento e habitações, a demanda deste bem no Brasil aumentará para os próximos anos, o que implica, conseqüentemente, em mais operações de produção no país.

A cal em si é um produto originada do calcário, com composição química abundante em calcário (CaCO_3). Ela é obtida através dos processos de calcinação, que envolvem a utilização de fornos, cujo princípio principal é o fornecimento de energia térmica a matéria prima, resultando na decomposição do calcário nos óxidos de interesse e gases resultantes do

processo. A Equação 1 mostra de forma simplificada a reação de decomposição do carbonato de cálcio, no caso calcário calcítico.



A manutenção da temperatura durante o processo é de extrema importância a fim de se obter um produto com qualidade dentro dos padrões estabelecidos para o tipo de cal a ser obtida. Tais tipos de cal estão associados ao tipo de aplicação em que serão empregados. As diferenças entre os tipos está relacionada às frações de CaO e MgO presentes no composto final. Se destacam a cal virgem calcítica (90-100% CaO, 0-5% MgO), magnésiana (65-90% CaO, 5-12% MgO) e dolomítica (58-65% CaO, >12% MgO (SILVA, 2009).

1.2 O PROCESSO

De modo geral, o processo de calcinação dentro dos fornos modernos envolvem três zonas, sendo elas: Zona de pré-aquecimento; zona de reação; zona de resfriamento. Na zona de pré-aquecimento, o material é aquecido até sua temperatura de dissociação. Na zona de reação altas temperaturas são mantidas através da queima constante de combustível de modo que a reação ocorra em todo o material. Por fim tem-se a zona de resfriamento onde tem se o produto sinterizado e após resfriado retirado do forno. O processo em si demanda cerca de 3202 KJ de energia térmica para se produzir 1 Kg de cal (FILKOSKI, 2018) e ocorre na faixa de 900 ° C a 1200° C (HILL,1997).

Atualmente existem diversos tipos de fornos, sendo os mais comuns os de barranco, vertical e rotativo, sendo este último de alta eficiência térmica. No caso da empresa que será estudada como caso real, é utilizado um forno rotativo com pré-aquecedor, que será discutido nas próximas seções deste trabalho.

1.3 OBJETIVO

O principal objetivo deste trabalho foi implementar uma planilha automatizada no Microsoft Excel (macro) para cálculos de temperatura de chama adiabática da combustão de biomassa e carvão em fornos de calcinação, a fim de se obter uma análise preliminar. A macro foi desenvolvida de forma que qualquer usuário possa inserir os dados de entrada e obter as relações de consumo entre os dois combustíveis. Ainda neste trabalho, é utilizada a

macro para se fazer uma avaliação preliminar da viabilidade de utilização de casca de café como combustível em um forno real, com os dados fornecidos pelo Roberto Rodrigues, administrador de um empreendimento de produção de cal, localizada em Minas Gerais.

1.4 JUSTIFICATIVAS

Tendo em vista um cenário mundial cada vez mais preocupado com as questões ambientais e o desenvolvimento sustentável, novas oportunidades de fontes energéticas devem ser pensadas e analisadas, a fim de se reduzir os impactos ambientais dos processos de calcinação, sendo atrelado a isso a viabilidade econômica destas alternativas.

Para uma noção de ordem de grandeza, a indústria de cal contribui com cerca de 5% de toda emissão de CO₂ no mundo (FILKOSKI, 2018), o que justifica a atenção para esta indústria que mesmo nos dias atuais apresenta exemplos não atualizados, perdendo em eficiência, qualidade do produto e responsabilidade ambiental.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TIPOS DE FORNOS

Como já mencionado, dentro da indústria da cal, existem diversas modalidades tecnológicas que são empregadas, podendo apresentar diferentes rendimentos energéticos ou até implicações na qualidade do produto final. De modo a trazer um maior entendimento dessas tecnologias, serão apresentadas e discutidas algumas das principais.

O forno do tipo rotativo consiste basicamente numa construção cilíndrica disposta de forma horizontal com um certo grau de inclinação, envolvida geralmente por um material metálico no lado externo e internamente revestido por um material refratário. O princípio de seu funcionamento consiste em seu movimento de rotação, de forma que isso atrelado a sua inclinação possibilite que o calcário seja movido ao longo do forno até sua saída pela parte mais baixa. O gases produzidos na combustão tem fluxo contrário ao movimento do calcário a ser sinterizado. A Figura 2 ilustra um exemplo deste forno.

Figura 2 - Forno Rotativo



Fonte: Agico Group (2019)

Esses fornos possuem vantagem quanto a maior versatilidade na utilização de combustíveis e diferente granulometrias do calcário. Além disso implicam em menor CO₂ residual. Entretanto tem elevado consumo de energia devido as perdas por radiação (JOHN *et al.*, 2014).

Dentre os tipos, tem-se o forno rotativo com pré aquecedor (estes menores) e o forno rotativo longo. O forno rotativo com pré aquecedor possui um rendimento térmico de cerca de 52% e o rotativo longo com rendimento de 40% sendo o rendimento térmico a razão do calor utilizado diretamente na reação de calcinação pelo calor total proveniente da queima do combustível utilizado no processo (PIRINGER, 2017).

Outro tipo de forno atualmente bastante utilizado é o forno do tipo vertical. Este tipo de forno possui alguns interessantes exemplos, sendo eles o de fluxo paralelo regenerativo e eixo anular.

O forno de fluxo paralelo regenerativo é formado por dois cilindros interligados por um canal. Ele é constituído pela zona de pré aquecimento, zona de aquecimento e zona de resfriamento, dispostas de cima para baixo. O calcário é inserido no forno pela parte superior e o combustível queimado através de queimadores em apenas um dos cilindros (forno de combustão) enquanto o outro cilindro recebe os gases provenientes da combustão do outro cilindro, com fluxo ascendente e aquecendo o calcário. Ao mesmo tempo, ar entra pela parte inferior dos dois cilindros para resfriar a cal já sinterizada (JOHN *et al.*, 2014). Os cilindros trabalham de formam alternada, de modo que num momento o cilindro que antes era o regenerativo, passa a receber o combustível para combustão, enquanto o outro passa ser o regenerativo, o que inverte a direção do fluxo. A Figura 3 mostra um exemplo deste forno.

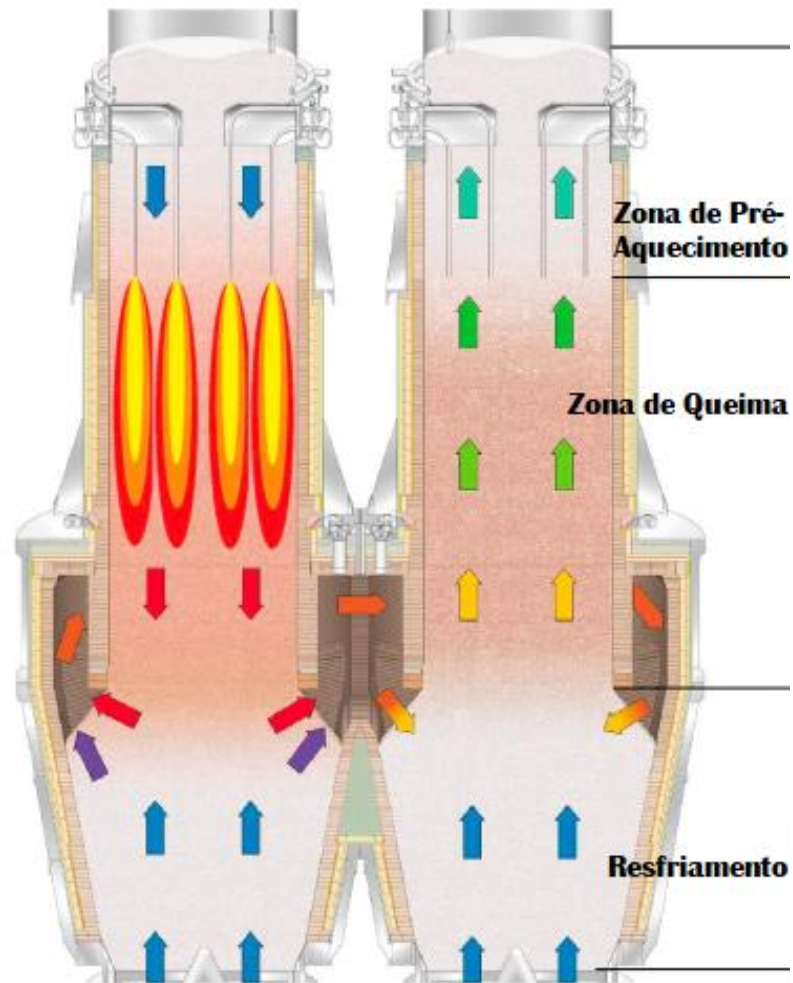
Figura 3 - Forno Vertical de Fluxo Paralelo Regenerativo



Fonte: Michele de Oliveira (2016)

Devido a característica deste forno em duas etapas, sendo elas a de queima, onde no primeiro cilindro ocorre a queima do combustível junto do aquecimento da carga e a etapa regenerativa, que os gases promovem o pré-aquecimento do ar em fluxos opostos (material desce, gases sobem), o processo apresenta um bom rendimento térmico, sendo cerca de 87% (PIRINGER, 2017). John *et al.* (2014) dizem também que além da boa eficiência energética, esta tecnologia permite o emprego de diferentes combustíveis, incluindo biomassa, porém possui desvantagem quanto ao elevado custo do material refratário. A Figura 4 apresenta um esquema desse tipo de forno.

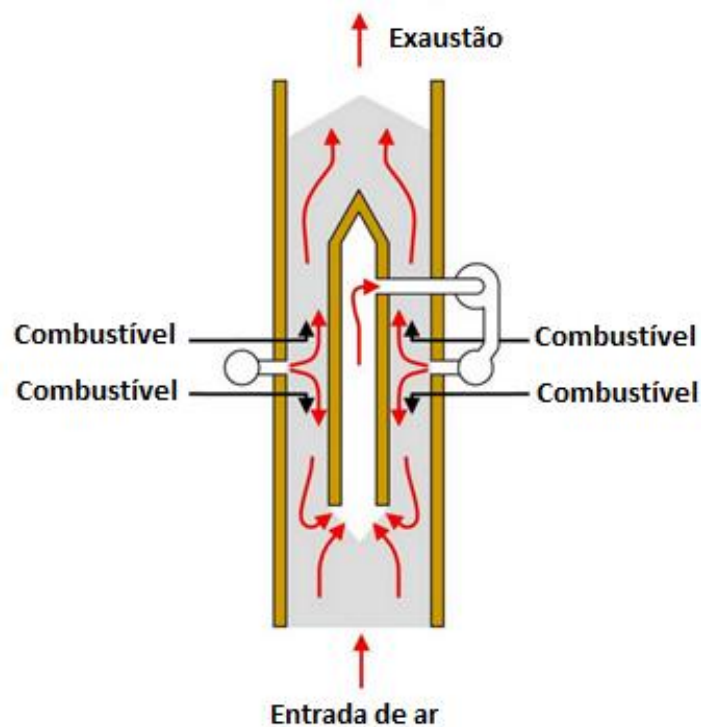
Figura 4 - Esquema Forno Vertical de Fluxo Paralelo Regenerativo



Fonte: Piringer (2017)

O forno de eixo anular por sua vez consiste num em dois cilindros, sendo um interno ao outro. A matéria prima fica disposta no espaço entre os dois eixos, onde é calcinada. Pela parte inferior do forno entra ar que ao passar pelo material calcinado, é pré aquecido e usado na combustão. Da mesma que no forno de vertical de fluxo paralelo, o calcário é depositado no forno pela parte superior do forno e o combustível é queimado nas laterais do forno. A Figura 5 mostra um esquema simplificado deste forno.

Figura 5 - Esquema Forno Vertical de Eixo Anular



Fonte: SANDVIK (2011)

Entre as vantagens deste forno, tem-se um aquecimento igualitário do material, o que proporciona uma melhor qualidade da cal produzida e um rendimento térmico alto de 77% quando utilizado com recuperador (PIRINGER, 2017). A manutenção das câmaras exteriores configuram uma desvantagem do equipamento (ELSON, 2017).

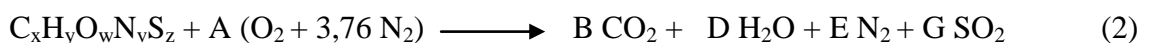
Outro tipo de forno é o de barranco. Este tipo de forno é geralmente apoiado em encostas e revestido de tijolos refratários, podendo ser contínuo ou descontínuo. O calcário é adicionado ao forno junto do combustível. Apresenta um consumo de combustível alto da ordem de 280 kg de óleo por tonelada de cal virgem, apresentando portanto um baixo rendimento (SILVA, 2009).

3 MÉTODO

3.1 HIPÓTESES

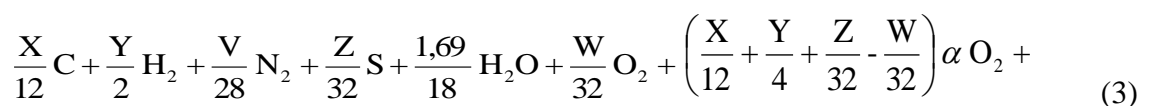
Como já mencionado, o objeto de análise da combustão é a temperatura de chama adiabática. Vale lembrar que esta temperatura não pode ser entendida como a temperatura real da chama, mas sim como um parâmetro que possa ser usado para comparar os dois combustíveis em análise, uma vez que é uma temperatura ideal, de forma que não haja troca térmica em suas vizinhanças, o que é impossível. Esta temperatura será utilizada como parâmetro de correção da proporção entre os dois combustíveis, de forma que se possa verificar a relação de massa entre os dois combustíveis que proporcione a mesma temperatura de chama.

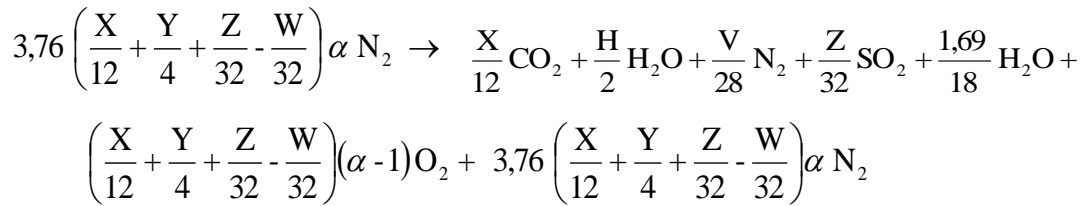
Por se tratar de combustíveis que se encontram no estado sólido, o equacionamento das reações se faz de forma mais precisa pela porcentagem de cada elemento presente, sendo eles carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), enxofre (S) e oxigênio (O). É também levada em conta a presença de cinzas e umidade, sendo esta possível de ser escolhida pelo usuário de acordo com o grau de secagem do carvão e da madeira. Toda a análise considera como base seca de 100g de cada um dos combustíveis. Além disso é considerada a combustão completa do combustível, de forma que ele seja consumido no processo e não haja sobras. Um exemplo genérico da reação de combustão estequiométrica na Equação 2.



3.2 CONSERVAÇÃO DE MASSA

Dispondo das porcentagens em massa dos elementos do combustível, é possível elaborar a reação de combustão e padronizar o cálculo dos coeficientes estequiométricos. Na Equação 3 é apresentado a reação, com os coeficientes em função das massas dos elementos presentes em 100g do combustível e do excesso de ar (α), com combustível isento de umidade.





Tendo os coeficientes de cada espécie química da reação em função de cada elemento do combustível, é possível automatizar o balanceamento da reação numa planilha em Excel, entrando apenas com a composição do combustível.

Como dito anteriormente, essa reação se realiza com base seca de combustível, entretanto na realidade, combustíveis sempre apresentam alguma umidade, expressa na fração de massa de água presente. Para fins de balanceamento, pode-se inserir a massa de água presente, tendo-se como entrada o valor K, que representa a razão de massa água por 100g de combustível seco. Pode ser facilmente balanceada inserindo seu coeficiente no lado dos reagentes e somando-o ao coeficiente de água gerada no processo de combustão.

Outra entrada de grande importância (que será um dos parâmetros ainda avaliados) é o excesso de ar. A fim de se garantir queima total do combustível, fornos de calcinação operam geralmente com excesso de ar, resultando no final do processo oxigênio (O₂) e nitrogênio (N₂) não reagidos. O excesso de ar é expresso pelo símbolo α , representando (1+excesso de ar). O produto de α pelo coeficiente do ar estequiométrico (A) resultam no coeficiente real de O₂ e N₂ (multiplicado pelo fator 3,76) do lado dos reagentes. O valor de α é dado também como valor de entrada.

A Figura 6 mostra como a reação é automatizada na planilha, apresentando as entradas e saídas respectivamente.

Figura 6 – Balanceamento Automatizado

| Lignitas Bruta | | Lignita Briquetes | | |
|----------------|--|-------------------|--|--------|
| 60,0 | | 53,8 | | C |
| 6,0 | | 7,7 | | H |
| 20,0 | | 27,7 | | O |
| 2,0 | | 1,5 | | N |
| 2,0 | | 1,5 | | S |
| 10,0 | | 7,7 | | Cinzas |

| | | REAGENTES | | PRODUTOS | |
|----------------|-------|-----------|------|------------------------|--------|
| | | C | 3,62 | CO2 | 3,62 |
| | | H | 5,25 | H2O | 3,40 |
| | | N | 0,14 | N2 | 14,78 |
| | | S | 0,00 | SO2 | 0,00 |
| Massa Água (g) | 14 | O | 2,76 | O2 | 0,36 |
| 1+e | 1,1 | A | 3,91 | | |
| K | 0,140 | | | T _{ar} [K] | 298,15 |
| | | H2O | 0,78 | T _{chama} [K] | 1782 |

Fonte: Autor

3.3 CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

Tendo agora os coeficientes estequiométricos bem definidos, é possível realizar o balanceamento de energia a fim de obterem as temperaturas finais do processo, no caso a temperatura de chama adiabática. O princípio dos cálculos se baseia na diferença entre as entalpias dos produtos e dos reagentes junto da energia liberada da reação, o que diz respeito inteiramente a 1ª Lei da Termodinâmica. Para o forno de calcinação, são desconsideradas a energia cinética e energia potencial gravitacional, restando apenas as entalpias. A Equação 4 mostra de forma simplificada esse conceito.

$$H_R = H_P + \Delta H \quad (4)$$

É necessário, então, realizar os cálculos da entalpias dos reagentes e dos produtos em função da temperatura. Um método bastante preciso é utilizando os coeficientes de NASA-Glenn que trazem as propriedades de uma vasta gama de espécies químicas e trazem métodos para cálculos dessas propriedades como entalpia e calor específico em função de coeficientes

específicos para cada espécie e da temperatura. A Figura 7 mostra um exemplo de como esses coeficientes são dispostos.

Figura 7 - Coeficientes NASA-Glenn

Appendix D (continued)

```

COCL          Gurvich,1991 pt1 p118 pt2 p91.
 2 tps91 C    1.000  1.00CL 1.00  0.00  0.00 0  63.4631000  -16000.000
 200.000    1000.0007 -2.0 -1.0  0.0  1.0  2.0  3.0  4.0  0.0  11550.749
 2.513175740D+04-5.969189670D+02 8.327671350D+00-7.056132590D-03 1.313150734D-05
-1.037059653D-08 3.033665179D-12  -7.052770320D+02-1.580716775D+01
 1000.000    6000.0007 -2.0 -1.0  0.0  1.0  2.0  3.0  4.0  0.0  11550.749
 3.443720240D+05-1.793143470D+03 8.392755900D+00-5.374769590D-04 9.113555710D-08
-3.111441728D-12-2.040435218D-16  6.914470150D+03-1.998919104D+01
COCL2        Gurvich,1991 pt1 p119 pt2 p92.
 2 tps91 C    1.000  1.00CL 2.00  0.00  0.00 0  98.9161000  -219500.000
 200.000    1000.0007 -2.0 -1.0  0.0  1.0  2.0  3.0  4.0  0.0  12878.622
 9.319321450D+04-1.577971273D+03 1.208353907D+01-4.809015610D-03 7.688477320D-06
-5.858841200D-09 1.687786559D-12  -2.054252334D+04-3.834767320D+01
 1000.000    6000.0007 -2.0 -1.0  0.0  1.0  2.0  3.0  4.0  0.0  12878.622
-2.545881891D+04-1.305958516D+03 1.092922584D+01-3.601210160D-04 7.787017650D-08
-8.792452030D-12 4.028696610D-16  -2.219847340D+04-3.233303450D+01
COFCL       Gurvich,1991 pt1 p146 pt2 p120.
 2 tps91 C    1.000  1.00F  1.00CL 1.00  0.00 0  82.4615032  -429492.862
 200.000    1000.0007 -2.0 -1.0  0.0  1.0  2.0  3.0  4.0  0.0  11903.798
 7.262173900D+04-1.019738175D+03 7.290911990D+00 7.420691710D-03-7.902548080D-06
 4.209427650D-09-9.314412900D-13  -4.804386460D+04-1.316923671D+01
 1000.000    6000.0007 -2.0 -1.0  0.0  1.0  2.0  3.0  4.0  0.0  11903.798
-5.316887910D+04-1.581009678D+03 1.112696501D+01-4.373000800D-04 9.464190710D-08
-1.069291346D-11 4.901756640D-16  -4.599667230D+04-3.525879824D+01

```

Fonte : NASA Glenn Coefficients for Calculating Thermodynamic Properties of Individual Species (2002)

O objetivo desses coeficientes nos cálculos é encontrar as entalpias dos gases dos produtos (CO_2 , $\text{H}_2\text{O}_{(g)}$, SO_2 , O_2 e NO_2) e de O_2 e N_2 nos reagentes em situações onde o ar de combustão é pré-aquecido. Para o caso do combustível, por se tratar de um sólido, não há uma fórmula molecular definida e portanto não há também meios calcular através dos coeficientes. Entretanto, conhecendo seu poder calorífico inferior (PCI) é possível obter sua entalpia, utilizando como referência a temperatura de 298,15 K (25°C). O trabalho traz a equação onde serão utilizados os coeficientes, mostrada na Equação 5.

$$H^0(T)/RT = -a_1T^{-2} + a_2 \ln T/T + a_3 + a_4T/2 + a_5T^2/3 + a_6T^3/4 + a_7T^4/5 + b_1/T \quad (5)$$

Cada coeficiente é tratado como a_i e b_i (para entalpia não utiliza-se o coeficiente b_2). T representa a temperatura e R a constante universal dos gases (8,31451 J/(mol K)). Tendo isso, os cálculos foram realizados levando em conta a seguinte igualdade mostrada na Equação 6.

$$(n_i h_{fi}^0)_R + (n_i \Delta h_i)_R - (n_i h_{fi}^0)_P - (n_i \Delta h_i)_P = 0 \quad (6)$$

O primeiro termo diz respeito ao somatório do produto das entalpias pelo seus coeficientes estequiométricos na temperatura de 298,15 K. O segundo termo se trata do produto dos coeficientes de O_2 e N_2 nos reagentes (ar) tomados a temperatura do ar pré-aquecido subtraído pelo primeiro termo. Caso não haja entrada de ar pré-aquecido ($T=298,15$ K) esse termo vai para zero. O terceiro termo diz respeito ao somatório do produto das entalpias dos gases pelo seus coeficientes estequiométricos, calculadas a temperatura de referência de 298,15 K. O quarto termo relaciona também o somatório dos produtos dos coeficientes dos gases pelas entalpias, porém desta vez calculadas na temperatura de final (chamada adiabática), que é nossa incógnita. Os cálculos se fazem de forma a encontrar este valor que faça a equação ir para zero.

Para o caso de haver umidade no combustível, ela é tratada na equação como calor latente de vaporização, uma vez que está na fase líquida e no final do processo está na fase vapor. Tendo a relação da massa de água para 100g de combustível seco, é possível saber o quanto de energia a ela é transferida.

4 RESULTADOS

4.1 PLANILHA

Com as equações definidas, foi possível inseri-las numa planilha de Excel que realiza cálculos através de fórmulas e macros que permitem automatizar. A Figura 8 mostra como os cálculos estão estruturados.

Figura 8 - Cálculos

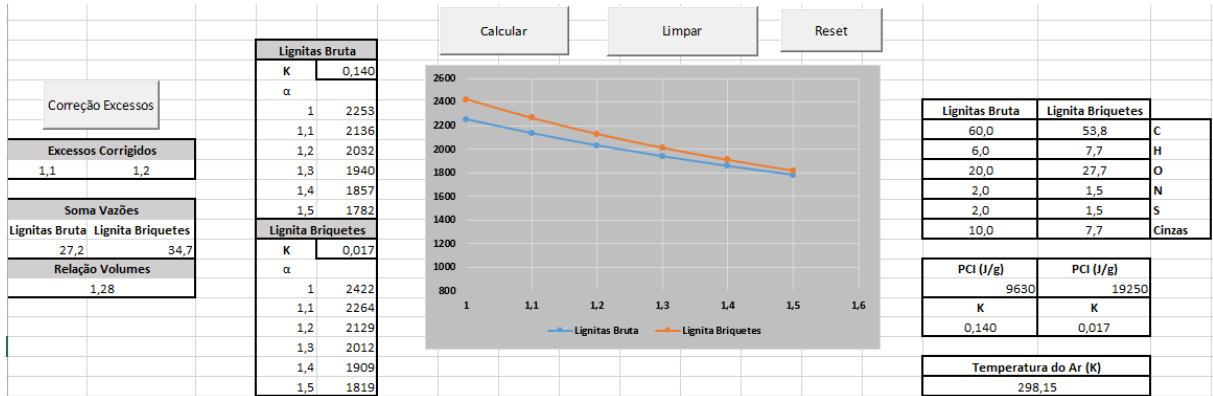
| REAGENTES | | | PRODUTOS | | | |
|-----------|------------------|---------|--------------------------|-----------------------|------------------------|--------|
| C | | 4,48 | CO2 | | 4,48 | |
| H | | 7,62 | H2O | | 3,90 | |
| N | | 0,11 | N2 | | 25,19 | |
| S | | 0,05 | SO2 | | 0,05 | |
| O | | 1,73 | O2 | | 1,11 | |
| A | | 6,68 | | | | |
| | | | $T_{ar}[K]$ | | 298,15 | |
| H2O | | 0,09444 | $T_{chama}[K]$ | | 1819 | |
| | | | $h^0_t(T_{ref}) [J/mol]$ | $h^0(T_{ar}) [J/mol]$ | | |
| Ar | O ₂ | 6,68408 | -1E-05 | -1E-05 | Somatório H_R | -8011 |
| | N ₂ | 25,1321 | 6E-06 | 6E-06 | Somatório ΔH_R | 0 |
| | | | | | Somatório H_p | -27222 |
| | | | | | Somatório ΔH_p | 19232 |
| | | | $h^0_t(T_{ref}) [J/mol]$ | $h^0(T_t) [J/mol]$ | | |
| Gases | CO ₂ | 4,48344 | -393510 | -312939 | 1ª Lei TD | -20 |
| | H ₂ O | 3,90252 | -241826 | -178022 | | |
| | N ₂ | 25,187 | 0 | 49657 | | |
| | SO ₂ | 0,04797 | -296810 | -216361 | | |
| | O ₂ | 1,11401 | 0 | 52404 | | |

Fonte: Autor

Em outra planilha estão dispostas os valores dos coeficientes da NASA, que são a base dos cálculos das entalpias de referência dos produtos e do ar pré-aquecido. Seus coeficientes foram diretamente retirados do trabalho NASA-Glenn.

De forma que se tenha uma planilha de fácil manipulação de dados pelo usuário, foi criada uma interface onde ele pode inserir os dados de entrada para seus cálculos. A Figura 9 mostra esta interface.

Figura 9 - Planilha de Entrada



Fonte: Autor

Num primeiro momento, o usuário deve entrar na parte a direita da planilha com os combustíveis que deseja comparar, de forma que possa comparar dois a dois. Na célula onde consta o nome do combustível há uma lista, que já contém alguns combustíveis já arquivados na planilha, dessa forma o usuário pode selecionar, e automaticamente as porcentagens de cada elemento são preenchidas junto do seu PCI. A célula abaixo, com o valor K, diz respeito a relação de massa de água para as 100g de combustível em análise, ficando a cargo do usuário seu preenchimento. Além disso, o usuário pode entrar com a temperatura do ar caso já pré-aquecido, o que tem impacto direto nos cálculos. A Figura 10 mostra o campo da seleção.

Figura 10 - Escolha dos Combustíveis

| Eucalipto | Antracíticos | |
|-----------|--------------|--------|
| 51,4 | 87,6 | C |
| 6,2 | 3,1 | H |
| 41,7 | 2,1 | O |
| 0,2 | 1,0 | N |
| 0,0 | 1,0 | S |
| 0,6 | 5,2 | Cinzas |
| PCI (J/g) | PCI (J/g) | |
| 17500 | 30100 | |
| K | K | |
| 0,140 | 0,017 | |

Fonte: Autor

Caso o usuário queira inserir um outro combustível, basta ele ir até a aba “Combustíveis” e entrar com sua composição em porcentagem de massa dos elementos C, H,

N, O, S, cinzas e seu PCI com base de massa seca. A planilha de entrada já conseguirá buscar os dados desse novo combustível. O banco de dados é mostrado na Figura 11.

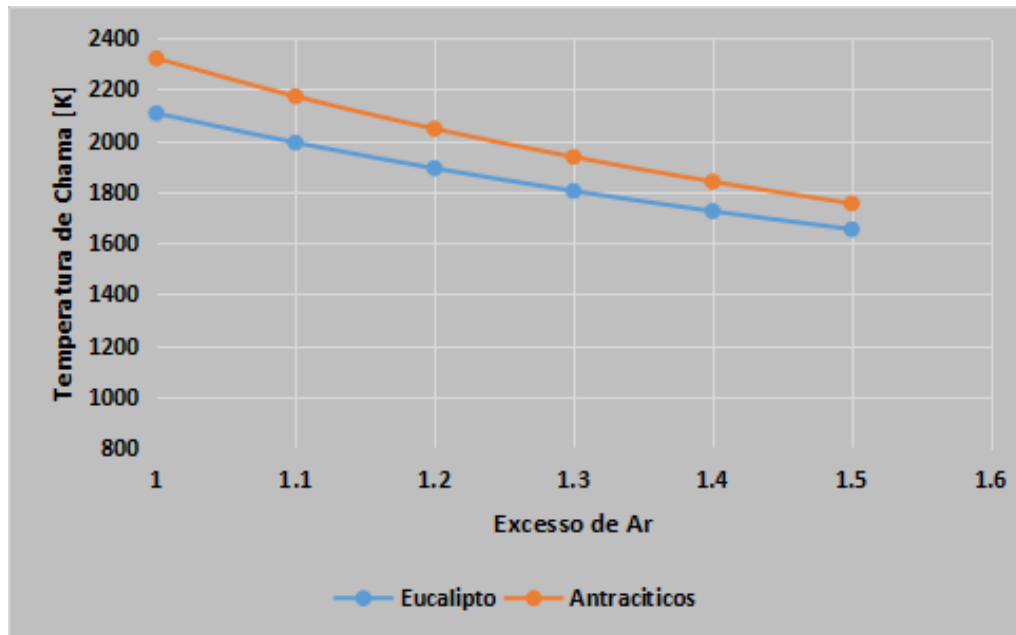
Figura 11 - Banco de Dados Combustíveis

| | A | B | C | D | E | F | G | H |
|----|-------------------------|------|-----|------|-----|-----|--------|---------|
| 1 | Combustível | C | H | O | N | S | Cinzas | PCI |
| 2 | Antracíticos | 87,6 | 3,1 | 2,1 | 1,0 | 1,0 | 5,2 | 30100,0 |
| 3 | Coque | 87,4 | 0,5 | 0,5 | 1,1 | 1,1 | 9,5 | 28900,0 |
| 4 | Hulha seca | 67,4 | 5,0 | 11,6 | 1,4 | 1,7 | 12,8 | 22930,0 |
| 5 | Lignitas Bruta | 60,0 | 6,0 | 20,0 | 2,0 | 2,0 | 10,0 | 9630,0 |
| 6 | Lignita Briquetes | 53,8 | 7,7 | 27,7 | 1,5 | 1,5 | 7,7 | 19250,0 |
| 7 | Lignita de madeira seca | 49,4 | 5,9 | 43,5 | 0,0 | 0,0 | 1,2 | 14650,0 |
| 8 | Eucalipto | 51,4 | 6,2 | 41,7 | 0,2 | 0,0 | 0,6 | 17500,0 |
| 9 | Bagaço de cana | 44,8 | 5,4 | 39,6 | 0,4 | 0,0 | 9,8 | 17100,0 |
| 10 | Casca de Arroz | 41,0 | 4,3 | 35,9 | 0,4 | 0,0 | 18,3 | 13300,0 |
| 11 | Casca de Café | 43,5 | 5,3 | 44,1 | 2,0 | 0,0 | 5,1 | 15900,0 |
| 12 | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | |

Fonte: Autor

Tendo os combustíveis já selecionados, basta clicar no botão calcular que os cálculos serão efetuados para os excessos de 10, 20, 30, 40 e 50% de ar (1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5). Ainda é construído um gráfico da temperatura em de chama, em kelvin, em função dos excessos de ar já mencionados. A Figura 12 mostra um exemplom deste gráfico.

Figura 12 - Exemplo Gráfico de Temperatura



Fonte: Autor

Por fim, a macro ainda faz uma análise da relação entre as massas dos combustíveis, de forma que ambos produzam a mesma quantidade de energia, portanto a mesma temperatura de chama. Para isso, após a construção do gráfico, o usuário precisa fixar uma temperatura e inserir no campo “Excessos Corrigidos” o excesso em que essa temperatura é atingida para esses dois combustíveis e após isso clicar no botão correção de excessos. A relação é disponibilizada no campo relação de volumes, sendo a razão entre a vazão de gases do combustível 2 pelo combustível 1. Esse valor representa o quanto do combustível 1 é necessário para produzir a mesma energia que o combustível 2. A Figura 13 apresenta a relação de consumo entre lenhas de eucalipto e carvão antracito.

Figura 13 – Relação de Volumes

| Correção Excessos | |
|---------------------|--------------|
| Excessos Corrigidos | |
| 1,1 | 1,2 |
| Soma Vazões | |
| Eucalipto | Antracíticos |
| 35,8 | 58,3 |
| Relação Volumes | |
| 1,63 | |

Fonte: Autor

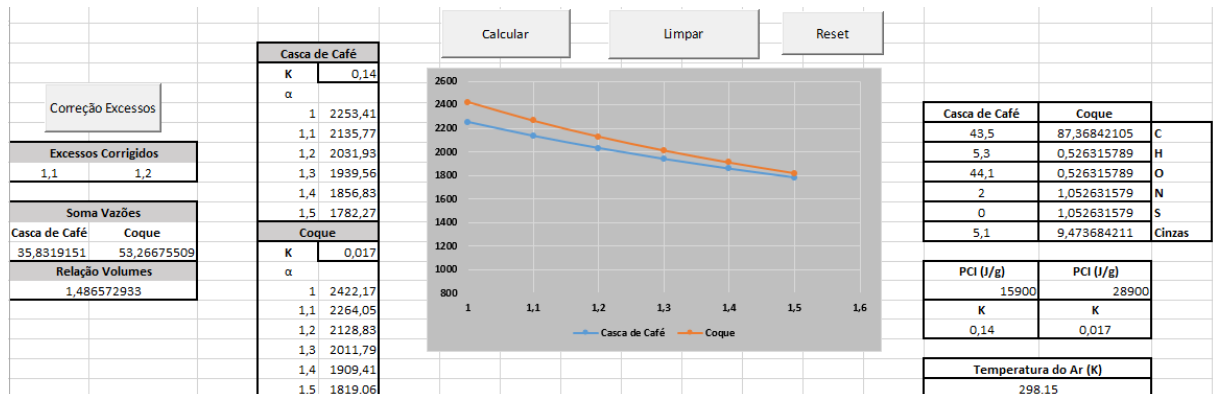
Vemos nesse exemplo que 176g de lenha de eucalipto produzem a mesma energia que 100g de carvão antracito. Dispondo ainda dos preços desses combustíveis, é possível fazer uma breve análise financeira da viabilidade da troca do combustível, de acordo com a tecnologia empregada no processo.

4.2 APLICAÇÃO EM CASO REAL

A fim de se entender melhor o funcionamento da planilha, foi realizado uma análise num forno de calcinação de uma empresa produtora de cal em Minas Gerais de Roberto. O principal forno utilizado em sua planta é do tipo rotativo com pré-aquecedor com uma capacidade de produção de 700 toneladas de cal por dia. Utiliza como combustível uma mistura de 60% de carvão vegetal e 40% de coque. Foi avaliada a opção de substituir o coque de petróleo por cascas de café, biomassa que possui custo relativamente baixo.

De início, inseriu-se na planilha os combustíveis de interesse, no caso coque de petróleo e casca de café. Tendo esses combustíveis como entrada. Após inserir, a macro de cálculos é ativada através do botão calcular, gerando as curvas de temperatura de chama em função dos excessos de ar. A umidade foi considerada para a casca de café em 14% ($K=0,140$) e 1,7% ($K=0,017$) para o coque. A Figura 14 mostra os resultados da análise.

Figura 14 – Análise Casca de Café



Fonte: Autor

Após isso, necessita-se realizar a correção dos excessos de ar. Nota-se que para excesso de ar para a casca de café de 1,1, a temperatura se iguala com o excesso de ar de 1,2 para o coque, na temperatura próxima de 2190 K. A Figura 15 mostra a relação de volumes da análise.

Figura 15 - Relação de Café e Coque

| Correção Excessos | |
|---------------------|-------|
| Excessos Corrigidos | |
| 1,1 | 1,2 |
| Soma Vazões | |
| Casca de Café | Coque |
| 27,2 | 42,7 |
| Relação Volumes | |
| 1,57 | |

Fonte: Autor

Pela a análise, verificou-se que são necessárias 157g de casca de café para se produzir a mesma energia que 100g de coque. Com isso, foi possível calcular a variação de custos para esta opção. Através de dados fornecidos por Roberto, o custo do coque é de R\$ 600,00 a tonelada enquanto o custo da tonelada de casca de café é de R\$ 140,00. Para uma análise breve, para se produzir a mesma energia, o custo para cada tonelada de coque substituído pela

casca de café varia de R\$ 600,00 para cerca de R\$ 218,00. Mesmo não considerando os custos logísticos, representa uma opção de grande viabilidade econômica.

5 CONCLUSÃO

Com este trabalho de conclusão de curso, é possível que outras empresas produtoras de cal, não apenas de Roberto Rodrigues, façam uso da macro para análise de substituição de combustíveis fósseis pela biomassa que apresenta menores custos, é renovável e ainda não tão danoso ao meio ambiente em comparação com outros combustíveis. É uma fonte de energia que já está em uso e há tendência de maior viabilidade e oferta conforme a demanda cresça, o que já esperado par aos próximos anos.

Também foi possível conhecer as diversas tecnologias produtoras de cal. Dependendo dela, tem-se maiores e rendimentos energéticos e melhor qualidade de cal. Mesmo sendo um processo bem antigo, ainda há muito a se estudar a viabilidade de outros métodos mais modernos.

REFERÊNCIAS

AGICO GROUP. **Rotary kiln for magnesium oxide**. Rotary kiln factory, 2019. Disponível em: <http://www.rotarykilnfactory.com/rotary-kiln-for-magnesium-oxide/>. Acesso em: 20 out. 2019.

FILKOSKI, R. V.; PETROVSKI, I. J.; GJURCHINOVSKI, Z. Energy optimisation of vertical shaft kiln operation in the process of dolomite calcination. **Thermal Science**, Escófia, v. 22, n. 5, p. 2123-2135, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.2298/TSCI180125278F>. Acesso em: 14 jul. 2019.

HILL, N.; MASON, K. **How to calculate the energy efficiency of your lime burning process**. Practical action, World Cement, 1997. Disponível em: https://www.humanitarianlibrary.org/sites/default/files/2014/02/PA_CalculatingEnergyEfficiencyLimeBurningProcess.pdf. Acesso em: 18 ago. 2019.

JOHN, V. M.; PUNHAGUI, K. R. G.; CINCOTTO, M. A. **Produção de cal: relatório final**. Ribeirão Preto: EBC, 2014.

PIRINGER, H.; OFENBAU, M.; STRASSE, R. W. Lime shaft kilns. **Energy Procedia**, Zurique, v. 120, n 3, p. 75-95, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.156>. Acesso em: 10 jun. 2019.

SANTOS, M. de. O.; FRANCA, V. V. Aplicação da tecnologia pinch em um forno de uma empresa produtora de cal no estado de Sergipe. *In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SERGIPE, 20., 2016, São Cristovão. Anais [...]*. São Cristovão: UFSE, 2016.

SILVA, E. R. **Uso do coque de petróleo como combustível nos fornos de calcinação**. Formiga: UNIFOR-MG, 2017.

SILVA, J. O. **Perfil da cal: relatório**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2009.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

CARVALHO, J. A.; MENDIBURU, A. A. Z.; CORONADO, C.J.R.; MCQUAY, M.Q. **Combustão aplicada**. Florianópolis: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, 2018. 372 p.

MCBRIDE, B. J.; ZEHE, M. J.; GORDON, S. **NASA glenn coefficients for calculating thermodynamic properties of individual species**. National Aeronautics and Space Administration Washington, DC. 2002.

MENDOZA, O. S. H. **Combustão**. Uberlândia: Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC – UFU, 2016.

PEREIRA, L. S.; FERREIRA, G. E. A indústria da cal no Brasil. *In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, 17., 2010, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.

QUINTEIRO, P.; TARELHO, L.; MARQUES, P.; GAMBOA, M. M.; FREIRE, F.; ARROJA, L.; DIAS, A. C. Life cycle assessment of wood pellets and wood split logs for residential heating. **Science of the Total Environment**, Aveiro, v. 689, n. 3, p. 580-589, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.420>. Acesso em: 11 set. 2019.

RODRIGUES, R. de A. **Potencial utilização de resíduos do processamento do café como combustíveis visando seu emprego em fornos rotativos de calcinação**. 2015. 83 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Industrial Química) – Universidade de São Paulo, Lorena, 2015.

SAIDUR, R.; HOSSAIN, M. S.; ISLAM, M. R.; FAYAZ, H.; MOHAMMED, H. A. A review on kiln system modeling. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kuala Lumpur, v. 15, n. 5, p. 2487-2500, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.020>. Acesso em 17 ago. 2019.

SCHÜRHAUS, P. **Produtos e propriedades energéticas da madeira**. Vitória: Centro Universitário de União da Vitória, 2007. (apostila).